

# **EFEITO DE SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS NOS PROCESSOS DE EMBEBIÇÃO DE PAREDES COM MÚLTIPLAS CAMADAS**

**TIAGO DE SOUSA MAGALHÃES RESENDE REGO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientadora: Professora Doutora Ana Sofia Moreira dos Santos Guimarães  
Teixeira

---

Coorientador: Doutor João Manuel do Paço Quesado Delgado

JUNHO DE 2014

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miéc@fe.up.pt](mailto:miéc@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais  
e à Teresa



## **AGRADECIMENTOS**

Ao concluir este trabalho, gostaria de expressar o meu profundo e sincero agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para a sua realização, nomeadamente:

À Professora Ana Sofia Guimarães, orientadora deste trabalho, pela amabilidade, dedicação e incentivo constante, e por se ter demonstrado plenamente disponível desde o início do desenvolvimento desta dissertação e sem a qual a sua concretização não seria possível.

Ao Doutor João Delgado pela coorientação e pela simpatia e disponibilidade demonstradas.

À Engenheira Francisca Cavaleiro e à Engenheira Joana Maia pela companhia e pelo apoio prestado durante a fase experimental do trabalho.

Aos meus pais pelo amor e educação que me deram e transmissão de valores, assim como pelo apoio incondicional em todas as fases da minha vida.

À minha namorada, Teresa, pelo companheirismo, amor, dedicação e incentivo.

À minha família pelo amor e carinho que sempre me deram.

Aos meus amigos pela nossa amizade e por todos os momentos de diversão que passamos juntos.



## **RESUMO**

A humidade ascensional é um dos principais problemas da construção associados ao uso de materiais porosos nesta indústria. Este mecanismo tem uma grande influência sobre a degradação de edifícios históricos, uma vez que estes foram construídos numa época em que as técnicas de construção não tinham em consideração a prevenção deste tipo de patologias. A humidade ascensional por si só pode reduzir o valor estético do edifício e, quando combinada com a existência de sais solúveis na construção e na água do solo pode mesmo conduzir à decomposição de material e comprometer o desempenho estrutural do edifício. Este efeito deve-se à migração dos sais dissolvidos na água na rede porosa das paredes dos edifícios, onde eles subsistem e cristalizam após a evaporação da água. Por consequência, são geradas elevadas pressões contra as paredes dos poros que, eventualmente resultam na sua fratura após vários ciclos de cristalização/dissolução.

O trabalho experimental teve como objetivo estudar o efeito de duas soluções saturadas, de sulfato de sódio e cloreto de potássio, nas curvas de absorção capilar obtidas através da imersão parcial de provetes de tijolo vermelho. Neste trabalho foi considerada mais uma variável, através da adição de diferentes interfaces no meio dos provetes (espaço de ar, contacto perfeito e continuidade hidráulica, esta conseguida pela utilização de uma camada de argamassa), todas frequentemente encontradas na construção. Assim, foi possível avaliar a resistência hídrica fornecida por cada interface em cada solução saturada salina, permitindo a comparação entre os dois. Quer a água pura, quer as amostras monolíticas foram utilizadas como referência, perfazendo um total de doze diferentes combinações testadas. No final, foi realizada uma avaliação macroscópica da superfície superior das várias amostras cristalizadas, obtidas após um período de secagem parcial. Os resultados mostraram diferenças significativas nos coeficientes de capilaridade obtidos quando as amostras são ensaiadas com soluções salinas.

**PALAVRAS-CHAVE:** humidade ascensional, sais solúveis, interface, capilaridade, materiais porosos.





## **ABSTRACT**

Rising damp is one of construction's major problems associated with the use of porous materials in this industry. This mechanism has a massive influence on the degradation of historical buildings since they were built in a time when construction technologies made no effort to prevent this kind of pathologies. The rising damp by itself can reduce the aesthetical value of the building and, when combined with the existence of soluble salts in the building and in the ground water can even lead to the material decomposition and compromise the structural performance of the building. This happens due to the migration of the salt ions dissolved in water into the porous network of the building's walls where they remain and crystalize after water evaporates, dealing great pressures against the pore walls and eventually resulting in their fracture after many cycles of crystallization/dissolution.

The experimental work intended to study the effect of two different saturated solutions of sodium sulphate and potassium chloride in the capillary absorption curves obtained through the partial immersion of red brick samples. In this work another variable was considered with the inclusion of three different interfaces in the middle of the sample (air space, perfect contact and hydraulic continuity, the last one accomplished by the use of a mortar layer), all commonly found in construction. Thus, it was possible to evaluate the hydric resistance provided by each interface to each salt saturated solution, allowing comparison between them. Both pure water and monolithic samples were also used as reference, fulfilling a total of twelve different combinations tested. In the end of this paper there will be a macroscopic evaluation of the sample's crystallized top surface, obtained after a partial drying period. The results revealed significant differences in the capillary coefficients obtained when samples were tested with salt solutions.

**KEYWORDS:** Rising damp, soluble salts, interface, capillary, porous materials.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO .....	2
<b>2. A AÇÃO DOS SAIS SOLÚVEIS.....</b>	<b>3</b>
2.1. OS SAIS E OS MATERIAIS POROSOS.....	3
2.1.1. SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS.....	3
2.1.2. CRISTALIZAÇÃO .....	4
2.1.3. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO .....	6
2.1.4. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO POROSO .....	7
2.1.5. HIGROSCOPICIDADE .....	10
2.2. TRANSPORTE DE HUMIDADE .....	11
2.2.1. INTRODUÇÃO.....	11
2.2.2. TRANSPORTE DE ÁGUA NA FASE LÍQUIDA .....	12
2.2.3. TRANSPORTE DE ÁGUA NA FASE DE VAPOR .....	14
2.2.4. SECAGEM .....	15
2.3. A ORIGEM DOS SAIS NOS EDIFÍCIOS .....	16
2.4. SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS SELECIONADAS .....	19
2.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	21
<b>3. ANÁLISE DO FENÓMENO DE INTERFACE .....</b>	<b>23</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	23
3.2. TIPOS DE INTERFACE .....	24
3.2.1. CONTACTO HIDRÁULICO.....	24
3.2.2. CONTACTO PERFEITO .....	28
3.2.3. ESPAÇO DE AR .....	31

<b>3.3. INFLUÊNCIA DA INTERFACE EM PROCESSOS DE EMBEBIÇÃO – RESULTADOS EXPECTÁVEIS..</b>	<b>32</b>
3.3.1. INTERFACE DE CONTACTO HIDRÁULICO.....	32
3.3.2. INTERFACE DE CONTACTO PERFEITO E DE ESPAÇO DE AR .....	34
<b>3.4. INFLUÊNCIA CONJUNTA DE SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS E DA INTERFACE EM PROCESSOS DE EMBEBIÇÃO – RESULTADOS ESPERADOS .....</b>	<b>35</b>
3.4.1. INFLUÊNCIA NO COEFICIENTE DE CAPILARIDADE.....	36
3.4.2. INFLUÊNCIA NO FLUXO MÁXIMO TRANSMITIDO .....	36
<b>3.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>	<b>37</b>

## **4. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DE SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS NA ABSORÇÃO DE PAREDES COM MÚLTIPLAS CAMADAS .....**

## **39**

<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2. PREPARAÇÃO DOS PROVETES .....</b>	<b>41</b>
4.2.1. CORTE DOS TIJOLOS .....	41
4.2.2. IMPERMEABILIZAÇÃO DAS FACES LATERAIS .....	42
4.2.3. MATERIALIZAÇÃO DA INTERFACE .....	43
4.2.4. SECAGEM EM ESTUFA .....	45
4.2.5. RESERVATÓRIOS E APOIOS .....	45
<b>4.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA VERTICAL .....</b>	<b>47</b>
4.3.1. ANÁLISE E SELEÇÃO DO PROCEDIMENTO A ADOTAR .....	47
4.3.2. TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA .....	47
4.3.3. PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS .....	48
4.3.4. ESCOLHA DA PERIODICIDADE DE PESAGEM .....	49
4.3.5. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS .....	50
<b>4.4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>51</b>
4.4.1. EFEITO DAS SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS .....	51
4.4.2. EFEITO DA EXISTÊNCIA E DO TIPO DE INTERFACE .....	57
4.4.3. EFEITO DE SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS NOS PROCESSOS DE EMBEBIÇÃO DE PROVETES COM MÚLTIPLAS CAMADAS .....	60
4.4.3.1. Influência no coeficiente de capilaridade da primeira camada.....	60
4.4.3.2. Influência na resistência hídrica da interface.....	67
4.4.4. SECAGEM PARCIAL DOS PROVETES.....	75
<b>4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>	<b>77</b>

<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>79</b>
<b>5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>79</b>
<b>5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>80</b>
 <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	 <b>81</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO 2 .....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO 3 .....</b>	<b>87</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curva de solubilidade de alguns compostos iónicos [1] .....	4
Figura 2.2 – Evolução da concentração de uma solução supersaturada até à saturação, adaptado [3]. .....	5
Figura 2.3 – Estados de concentração, adaptado [3]. .....	6
Figura 2.4 – Porosidade aberta (esquerda) e porosidade fechada (direita) [8]. .....	8
Figura 2.5 – Tortuosidade e constrictividade, adaptado [13]. .....	9
Figura 2.6 – Resumo da caracterização do meio poroso. ....	9
Figura 2.7 – Transporte de água por capilaridade [8]. .....	12
Figura 2.8 – Representação do ângulo de contacto entre o líquido e superfície hidrófugas e hidrófilas [18]. .....	13
Figura 2.9 – Secagem unidirecional de materiais porosos. ....	16
Figura 2.10 – Eflorescências na superfície inferior de uma lage de betão em Otava, Canadá [24]. ....	17
Figura 2.11 – a) Degradação causada por sais de edifício em Veneza, Itália e b) degradação de edifício em Adelaide, Austrália. ....	18
Figura 2.12 – Desintegração da argamassa de reboco, Moinho de Maré de Corroios (esquerda) e Eflorescências com destacamento da pintura, Mosteiro de Alcobaça (direita) [5]. .....	19
Figura 2.13 – Estimativa das curvas de absorção capilar obtidas nos ensaios. ....	20
Figura 3.1 – Tipos de configurações de contacto: contacto hidráulico (esquerda), contacto perfeito (centro) e espaço de ar (direita) [22]. .....	24
Figura 3.2 – Princípio de cálculo da relação $R(p_c)$ [29]. .....	25
Figura 3.3 – Influência da interface de contacto hidráulico real na absorção de água por capilaridade [30]. ....	25
Figura 3.4 – Provetes de contacto hidráulico com diferentes condições de cura da argamassa. ....	26
Figura 3.5 – Curvas de absorção de água por capilaridade em provetes de contacto hidráulico com diferentes condições de cura [31]. ....	27
Figura 3.6 – Curvas de absorção de água por capilaridade na interface de provetes de contacto hidráulico com diferentes condições de cura [31]. ....	27
Figura 3.7 – Imagem microscópica dos provetes de argamassa curados a húmido (esquerda) e a seco (direita) [31]. .....	28
Figura 3.8 – Representação de provetes fraturados (a) e cortados (b). ....	28
Figura 3.9 – Provetes de tijolo com interface de contacto perfeito com altura variável ensaiados por V. Freitas [29]. ....	29
Figura 3.10 - Influência da interface de contacto perfeito a altura variável [29]. ....	30
Figura 3.11 – Princípio de cálculo da relação $S(\phi)$ [29]. .....	31
Figura 3.12 - Influência da interface de espaço de ar em diferentes materiais [29]. ....	32
Figura 3.13 – Curva de absorção de água por capilaridade estimada em provetes com interface de contacto hidráulico em que a frente húmida não atravessa a interface. ....	33

Figura 3.14 - Curva de absorção de água por capilaridade estimada em provetes com interface de contacto hidráulico em que a frente húmida atravessa a interface e o provete fica saturado.....	34
Figura 3.15 - Curva de absorção de água por capilaridade estimada em provetes com interface CP e EA.....	35
Figura 3.16 – Curvas de absorção por capilaridade em função do tempo, para provetes CP ou PC, imersos em diferentes soluções.....	36
Figura 3.17 – Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, de provetes com espaço de ar imersos em diferentes soluções. ....	37
Figura 4.1 –Provetes ensaiados.....	40
Figura 4.2 – Combinações de provetes/fluidos ensaiados. ....	40
Figura 4.3 – Corte dos tijolos com rebarbadora.....	41
Figura 4.4 - Peças de tijolo cortadas com as dimensões finais. ....	41
Figura 4.5 - Resina epóxi Sika Icosit k-101 N (componentes A e B).....	42
Figura 4.6 a) e b) – Adição do componente B ao A com auxílio de balança e posterior mistura. ....	42
Figura 4.7 - Impermeabilização dos provetes.....	43
Figura 4.8 a) e b) - Colocação da argamassa com auxílio de grampos e cofragens. ....	43
Figura 4.9 - Ligação dos provetes de CP com fita-cola de alumínio. ....	44
Figura 4.10 a) e b) - Ligação dos provetes espaço de ar com placas de alumínio. ....	44
Figura 4.11 - Secagem dos provetes na estufa.....	45
Figura 4.12 – Reservatório a utilizar nos ensaios.....	45
Figura 4.13 – Apoios de zinco antes (esquerda) e após (direita) os ensaios. ....	46
Figura 4.14 – Apoio com base de polietileno.....	46
Figura 4.15 – Aparelho utilizado para medir a Temperatura e a HR da ambiência, HOBO U10.....	48
Figura 4.16 – Curva de solubilidade de KCl e Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	49
Figura 4.17 – Agitador magnético.....	49
Figura 4.18 – Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes monolíticos parcialmente imersos em água.....	52
Figura 4.19 – Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes monolíticos parcialmente imersos em solução saturada de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	53
Figura 4.20 – Bases dos provetes com superfície original do tijolo (esquerda) e superfície resultante do corte (direita).....	54
Figura 4.21 – Curvas obtidas por regressão polinomial de 2º grau em provetes monolíticos imersos em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	54
Figura 4.22 – Retas obtidas por derivação das equações polinomiais de 2º grau dos provetes monolíticos imersos em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	55
Figura 4.23 – Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes monolíticos parcialmente imersos em solução saturada de KCl. ....	55



Figura 4.24 – Coeficiente de capilaridade de provetes monolíticos imersos nas soluções em estudo.....	57
Figura 4.25 – Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes de contacto perfeito parcialmente imersos em água.....	57
Figura 4.26 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes espaço de ar parcialmente imersos em água.....	58
Figura 4.27 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes pasta de contacto parcialmente imersos em água.....	59
Figura 4.28 – Análise dos troços lineares da curva de absorção, em função da raiz do tempo, dos provetes de pasta de contacto parcialmente imersos em água.....	60
Figura 4.29 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes contacto perfeito parcialmente imersos em água.....	61
Figura 4.30 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes espaço de ar parcialmente imersos em água.....	61
Figura 4.31 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes pasta de contacto parcialmente imersos em água.....	62
Figura 4.32 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes contacto perfeito parcialmente imersos em $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	63
Figura 4.33 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes espaço de ar parcialmente imersos em $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	63
Figura 4.34 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes pasta de contacto parcialmente imersos em $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	64
Figura 4.35 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes contacto perfeito parcialmente imersos em KCl.....	65
Figura 4.36 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes espaço de ar parcialmente imersos em KCl.....	65
Figura 4.37 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes pasta de contacto parcialmente imersos em KCl.....	66
Figura 4.38 – Coeficiente de capilaridade de provetes monolíticos e com interface imersos nas soluções em estudo.....	67
Figura 4.39 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes contacto perfeito parcialmente imersos em $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	68
Figura 4.40 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes contacto perfeito parcialmente imersos em KCl.....	69
Figura 4.41 – FLUMAX em provetes com interface de contacto perfeito.....	70
Figura 4.42 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com espaço de ar parcialmente imersos em $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	70
Figura 4.43 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com espaço de ar parcialmente imersos em KCl.....	71
Figura 4.44 – FLUMAX em provetes de interface com espaço de ar.....	72

Figura 4.45 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com pasta de contacto parcialmente imersos em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . .....	73
Figura 4.46- Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com pasta de contacto parcialmente imersos em KCl.....	74
Figura 4.47 – FLUMAX em provetes de interface com pasta de contacto.....	75
Figura 4.48 – Cristalização no fim do ensaio (esquerda) e após 4 semanas de secagem (direita) de provetes monolíticos imersos em solução saturada de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	76
Figura 4.49 – Cristalização no fim do ensaio (esquerda) e após 4 semanas de secagem (direita) de provetes monolíticos imersos em solução saturada de KCl. ....	76
Figura 4.50 - Cristalização ao fim de 5 semanas em provetes com espaço de ar imersos em solução saturada de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	77
Figura 4.51 - Cristalização ao fim de 5 semanas em provetes com espaço de ar imersos em solução saturada de KCl.....	77

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – $HR_{eq}$ de alguns dos sais mais comuns à temperatura de 20 °C, adaptado [15].	11
Tabela 2.2 – Origem dos principais aniões, [21] adaptado de [5].	17
Tabela 2.3 – Valores do coeficiente de capilaridade médio em provetes de tijolo, adaptado de [21].	20
Tabela 3.1 – Fluxo máximo transmitido em configurações de contacto perfeito, adaptado de [29].	30
Tabela 3.2 – Valores de fluxo máximo transmitido em diferentes interfaces, adaptado de [29].	35
Tabela 4.1 – Estatística descritiva dos valores registados para a temperatura e HR.	48
Tabela 4.2 – Coeficiente de absorção por capilaridade de provetes monolíticos imersos em água.	52
Tabela 4.3 - Coeficiente de absorção por capilaridade de provetes monolíticos imersos em $Na_2SO_4$ .	53
Tabela 4.4 - Coeficiente de absorção por capilaridade de provetes monolíticos imersos em KCl.	56
Tabela 4.5 – Coeficiente de capilaridade de tijolo maciço imerso em água obtido por outros autores.	56
Tabela 4.6 – FLUMAX em provetes contacto perfeito imersos em água.	58
Tabela 4.7 - FLUMAX em provetes espaço de ar imersos em água.	58
Tabela 4.8 - FLUMAX em provetes pasta de contacto imersos em água.	59
Tabela 4.9 - Coeficiente de absorção por capilaridade de provetes com interface parcialmente imersos em água.	62
Tabela 4.10 - Coeficiente de absorção por capilaridade de provetes com interface parcialmente imersos em $Na_2SO_4$ .	64
Tabela 4.11 - Coeficiente de absorção por capilaridade de provetes com interface parcialmente imersos em KCl.	66
Tabela 4.12 – FLUMAX em provetes contacto perfeito parcialmente imersos em $Na_2SO_4$ .	68
Tabela 4.13 – FLUMAX em provetes contacto perfeito parcialmente imersos em KCl.	69
Tabela 4.14 – FLUMAX em provetes com espaço de ar parcialmente imersos em $Na_2SO_4$ .	71
Tabela 4.15 - FLUMAX em provetes com espaço de ar parcialmente imersos em KCl.	71
Tabela 4.16 – FLUMAX em provetes com pasta de contacto parcialmente imersos em $Na_2SO_4$ .	73
Tabela 4.17 – FLUMAX em provetes com pasta de contacto parcialmente imersos em KCl.	74
Tabela 4.18 – Tabela resumo dos resultados obtidos na campanha experimental.	78



## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

$\delta$  – Constrictividade [-]

$\delta_v$  – Coeficiente de difusão do vapor de água no ar [kg/(m.s.Pa)]

$\Delta p$  – Pressão de cristalização [MPa]

$\varepsilon$  – Porosidade [%]

$\eta$  – Viscosidade dinâmica da água [kg/(m.s)]

$\theta$  – Ângulo de contacto [°]

$\mu$  – Fator de resistência à difusão de vapor de água [-]

$\pi$  – Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água [kg/(m.s.Pa)]

$\rho$  – Peso volumico da água [kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma$  – Tensão superficial do líquido [N/m]

$\tau$  – Tortuosidade [-]

$A$  – Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/(m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>)]

$B$  – Coeficiente de penetração de água por capilaridade [m/s<sup>1/2</sup>]

$C$  – Concentração da solução [M]

$C_s$  – Concentração correspondente ao estado de saturação para um determinado sal [M]

$D_v$  – Coeficiente de difusão [m<sup>2</sup>/s]

$g$  – Constante gravitacional [m<sup>2</sup>/s]

$H_0$  – Altura de ascensão capilar em condições de equilíbrio [m]

$j$  – Fluxo de difusão [kg/(m<sup>2</sup>.s)]

$p_c$  – Pressão capilar [Pa]

$p_v$  – Pressão de vapor de água [Pa]

$q$  – Fluxo de humidade [kg/(m<sup>2</sup>.s)]

$r$  – Raio de curvatura principal [m]

$R$  – Constante dos gases ideais [MPa.cm<sup>3</sup>/(mol.K)]

$t_{ind}$  – período de indução da cristalização [s]

$T$  – Temperatura [K]

$V_c$  – Volume molar do sal cristalizado [l/mol]

$V_v$  – Volume de vazios [m<sup>3</sup>]

$V$  – Volume total aparente [m<sup>3</sup>]

M – Provetes monolíticos

CP – Provetes com interface de contacto perfeito

EA – Provetes com espaço de ar entre camadas

PC – Provetes com pasta de contacto

FLUMAX – Fluxo máximo Transmitido [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

HR – Humidade relativa [%]

HR<sub>eq</sub> – Humidade relativa de equilíbrio [%]

LFC – Laboratório de Física das Construções

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

Os materiais utilizados na construção apresentam características porosas que são favoráveis à fixação de humidade através de mecanismos como a capilaridade, a higroscopicidade e a condensação. Este trabalho foca-se essencialmente num dos fenómenos de propagação de humidade que maior degradação causa nos edifícios, a humidade ascensional. Esta pode ser explicada pela migração por capilaridade de água proveniente do solo através da rede porosa dos materiais que constituem as paredes e os pavimentos dos edifícios. Este tipo de humidade assume maior expressão em edifícios antigos, maioritariamente construídos em alvenaria, nos quais foram utilizados materiais porosos como tijolos cerâmicos, argamassas e materiais pétreos e cuja proteção contra este fenómeno é praticamente inexistente.

A presença de sais dissolvidos na água que ascende a rede porosa dos elementos construtivos constitui um fator agravante na degradação dos edifícios. Se por um lado os sais acompanham a água durante a sua ascensão, o mesmo não acontece quando esta se evapora, permanecendo estes na estrutura porosa dos materiais que constituem os elementos construtivos. Quando a água presente na rede porosa é insuficiente para manter os sais dissolvidos, estes cristalizam, podendo este fenómeno causar graves consequências para os edifícios, tanto a nível estético como estrutural. Estas consequências ocorrem normalmente a longo prazo e após vários ciclos de cristalização/dissolução que são gerados essencialmente por oscilações termohigrométricas.

Os sistemas construtivos, em particular a alvenaria, baseiam a sua eficiência funcional na combinação de materiais com diferentes características. No entanto, esta heterogeneidade dos elementos construtivos torna a análise da transferência de humidade mais complexa, obrigando ao conhecimento não apenas das suas características individuais mas também das condições de continuidade da interface que separa os diferentes materiais.

Existem vários estudos sobre a ação dos sais solúveis em materiais porosos, assim como alguns direcionados para a compreensão da transferência de humidade através de diferentes tipos de interface. No entanto, não há registo de estudos que considerem a influência simultânea destes dois parâmetros nos processos de transferência de humidade em materiais porosos utilizados na construção. Assim, pretende-se com este trabalho contribuir para o conhecimento científico nesta área. Neste contexto, o trabalho desenvolvido não se limitou a efetuar o levantamento do estado-da-arte no que diz respeito à ação dos sais solúveis em materiais porosos e ao fenómeno da interface na transferência de humidade, mas foi também levada a cabo uma campanha experimental no sentido de ser analisada, em laboratório, a sua ação conjunta.

## **1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO**

Do ponto de vista teórico, este trabalho teve como principal objetivo compreender o tipo de patologias associado à ação de sais solúveis em materiais porosos, assim como perceber o fenómeno da interface e a sua influência na transferência de humidade no mesmo tipo de materiais.

Os principais objetivos do estudo experimental consistiram em analisar, experimentalmente em laboratório, a influência de dois tipos de sais no coeficiente de capilaridade de provetes monolíticos e de provetes com os três tipos de interface identificados, bem como o de avaliar quantitativamente a resistência hídrica produzida pelas interfaces.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO**

Este trabalho divide-se em cinco capítulos abaixo referenciados:

- O capítulo 1, corresponde ao capítulo atual e introdutório do trabalho, onde se enquadra o tema, se demonstra a sua importância e se definem os objetivos e a organização estrutural do trabalho;
- O capítulo 2, aborda toda a teoria relacionada com os sais solúveis e com os materiais porosos, necessária à compreensão do trabalho. É apresentado o conceito de coeficiente de capilaridade e são selecionadas as soluções aquosas salinas a ensaiar na fase experimental;
- O capítulo 3, pretende descrever os tipos de interface entre materiais presentes nos edifícios, assim como a sua influência nos processos de transferência de humidade. Apresenta o conceito de fluxo máximo transmitido, uma vez que este caracteriza a resistência hídrica fornecida pelos diferentes tipos de interface;
- O capítulo 4, descreve detalhadamente toda a campanha experimental levada a cabo, bem como os resultados obtidos. Nesta parte são calculados e, posteriormente, comparados os diferentes valores de coeficiente de capilaridade e fluxo máximo transmitido para as diferentes combinações provete/solução ensaiadas;
- O capítulo 5, apresenta as considerações finais da dissertação e refere as principais conclusões resultantes da campanha experimental.



## 2

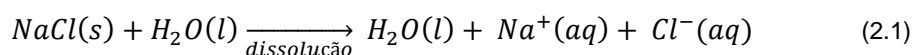
## A AÇÃO DOS SAIS SOLÚVEIS

## 2.1. OS SAIS E OS MATERIAIS POROSOS

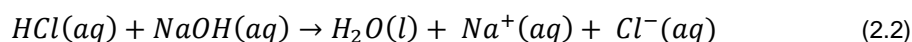
## 2.1.1. SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS

Soluções são misturas homogêneas de duas ou mais substâncias que podem ser encontradas em qualquer estado da matéria (sólido, líquido ou gasoso). Das soluções fazem parte dois tipos de substâncias, o solvente, que representa a substância existente na solução em maior quantidade, e o soluto, que se encontra dissolvido no solvente em quantidades inferiores a este [1]. Para o presente estudo interessa apenas focar nas soluções aquosas salinas que correspondem a soluções em que o solvente é a água e os solutos são sais. Nem todos os sais são solúveis na água, tendo especial interesse os que apresentam esta característica.

Os sais são compostos iónicos, pelo que são formados por catiões (iões com carga positiva) e aniões (iões com carga negativa) ligados através de ligações iónicas. Quando dissolvidos em água os iões dissociam-se, formando catiões e aniões livres, obtendo-se uma solução aquosa salina (equação 2.1). Ao nível molecular este processo ocorre devido à ação atrativa que as moléculas da água exercem sobre cada um dos iões e que se sobrepõe à força atrativa que estes exercem entre si [1], [2].



Outra forma de se obterem soluções aquosas salinas passa pelo processo de neutralização entre um ácido e uma base. Quando uma solução ácida e básica se misturam, ocorre uma reação de neutralização cujos produtos de reação não têm nenhuma das propriedades características dos reagentes. Os iões hidrogénio ( $H^+$ ) que fornecem a acidez à solução ácida combinam-se com os iões hidróxido ( $OH^-$ ) da solução básica formando moléculas de água e deixando livres os restantes iões (equação 2.2) [1].



A concentração é o termo utilizado para designar a quantidade de um determinado soluto dissolvido numa determinada quantidade de solvente. A unidade mais utilizada para quantificar a concentração de soluto em soluções designa-se molaridade ou concentração molar e corresponde à razão entre a quantidade em moles de soluto e o volume da solução em litros (equação 2.3) [1].

$$\text{Molaridade (M)} = \frac{\text{moles de soluto (n)}}{\text{litros de solução (V}_t\text{)}} \quad (2.3)$$

À medida que é adicionado soluto numa solução, em determinadas condições de temperatura e pressão constante, a concentração da solução vai aumentando até um determinado estado de equilíbrio em que o solvente deixa de ter capacidade de dissolver o soluto e este pode começar a depositar. Quando a solução atinge este estado limite de concentração diz-se saturada sendo que este varia consoante a temperatura e a pressão a que a solução se encontra sujeita. Ao contrário das soluções gasosas, o efeito da pressão na concentração de saturação em soluções líquidas é negligenciável, pelo que não será necessário abordar este aspeto com maior profundidade. Contudo, importa referir que a quantidade de soluto necessária para se atingir o estado de saturação também depende da substância dissolvida, sendo esta uma característica do soluto designada de solubilidade [1].

A solubilidade da maior parte dos compostos sólidos iónicos na água aumenta com a temperatura. Observa-se na figura 2.1 a variação da solubilidade de alguns compostos, onde surge ainda uma das poucas exceções a esta regra, o sulfato de cério ( $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$ ).

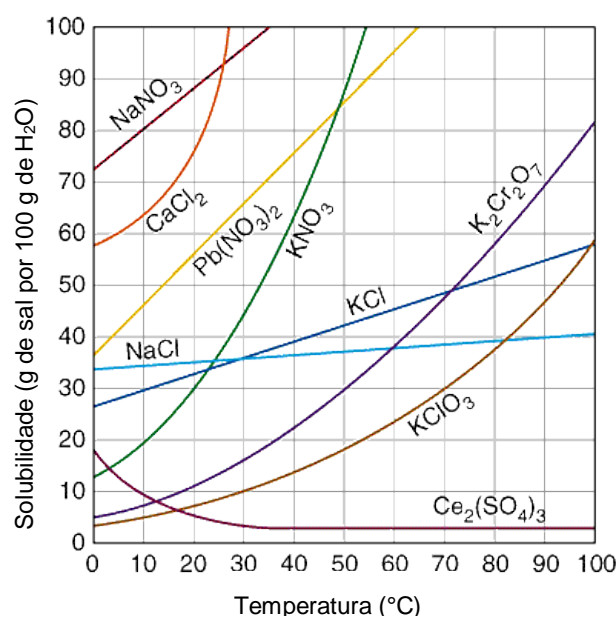


Figura 2.1 – Curva de solubilidade de alguns compostos iónicos [1]

### 2.1.2. CRISTALIZAÇÃO

A cristalização é o processo de formação e deposição de cristais sólidos em soluções homogéneas, para a qual o estado de supersaturação é um catalisador necessário. Como já foi referido, uma solução saturada é aquela que contém a quantidade máxima de soluto dissolvida numa determinada quantidade de solvente em determinadas condições de pressão e temperatura. No entanto é possível exceder esse limite de concentração das soluções sem se verificar imediatamente a deposição de sais, designando-se

estas de soluções supersaturadas [1]. Deste modo, e face ao exposto, deduzem-se dois processos que conduzem as soluções ao estado de supersaturação:

- A evaporação do solvente e consequente aumento da concentração;
- Alterações na temperatura da solução e consequente diminuição da solubilidade do soluto.

A cristalização a partir de soluções processa-se em duas fases sucessivas, a nucleação e o crescimento dos cristais. Numa primeira fase dá-se a formação dos primeiros núcleos de cristais e à medida que estes vão crescendo, novos núcleos se vão formando, acabando as duas fases por se desenrolar simultaneamente enquanto a solução se encontrar supersaturada [3], [4], [5].

A nucleação é a etapa em que as moléculas do soluto dispersas no solvente iniciam a sua agregação em aglomerados atômicos. Estes aglomerados constituem núcleos de cristais estabilizando apenas a partir de um determinado tamanho crítico dependente das condições de operação (temperatura, supersaturação, irregularidades...). Na sequência da nucleação, os núcleos formados atuam como ponto de convergência para as restantes moléculas de soluto que se ligam a estes possibilitando o crescimento dos cristais [3], [4].

Embora as soluções supersaturadas não se encontrem em equilíbrio, o processo de cristalização pode não ocorrer no imediato momento em que as soluções transitam do estado de saturação para o de supersaturação. Segundo Strege [3], existe uma amplitude de valores de concentração entre a saturação e a supersaturação crítica para a qual a cristalização não é espontânea, encontrando-se a solução no estado metaestável. O mesmo autor refere-se a período de indução como o intervalo de tempo entre a altura em que a solução entra em supersaturação constante e o momento em que se obtém núcleos de cristais de tamanho detetável. Nalguns sistemas, principalmente nos de baixo valor de supersaturação, constata-se também um atraso considerável entre a fase em que os cristais se tornam detetáveis e o momento em que a concentração da solução começa a diminuir consideravelmente. O intervalo de tempo total até se verificar esse decréscimo de concentração designa-se período latente (figura 2.2) [3].

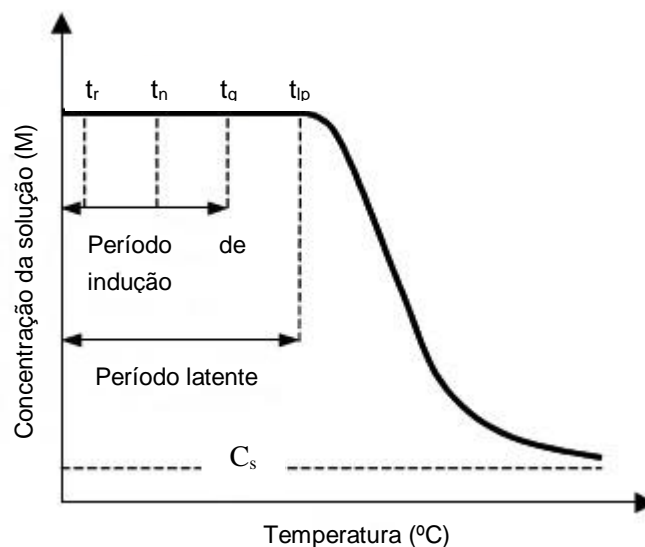


Figura 2.2 – Evolução da concentração de uma solução supersaturada até à saturação, adaptado [3].

Na figura 2.3 estão representados os diferentes estados de concentração. Abaixo da curva de solubilidade a solução encontra-se não saturada, ou seja, não é possível ocorrer cristalização. Numa fase posterior à nucleação, esta curva representa um estado de equilíbrio em que crescimento dos cristais e a sua dissolução ocorrem na mesma ordem de grandeza. Imediatamente acima da curva de solubilidade encontra-se o estado metaestável anteriormente referido. Quanto mais distante desta curva estiver o ponto correspondente ao estado de supersaturação da solução menor será o período de indução, ou seja, mais rapidamente se verifica a cristalização. Com o limite do estado metaestável atinge-se a saturação crítica cujo período de indução é zero e a partir do qual a cristalização se inicia imediatamente [3].

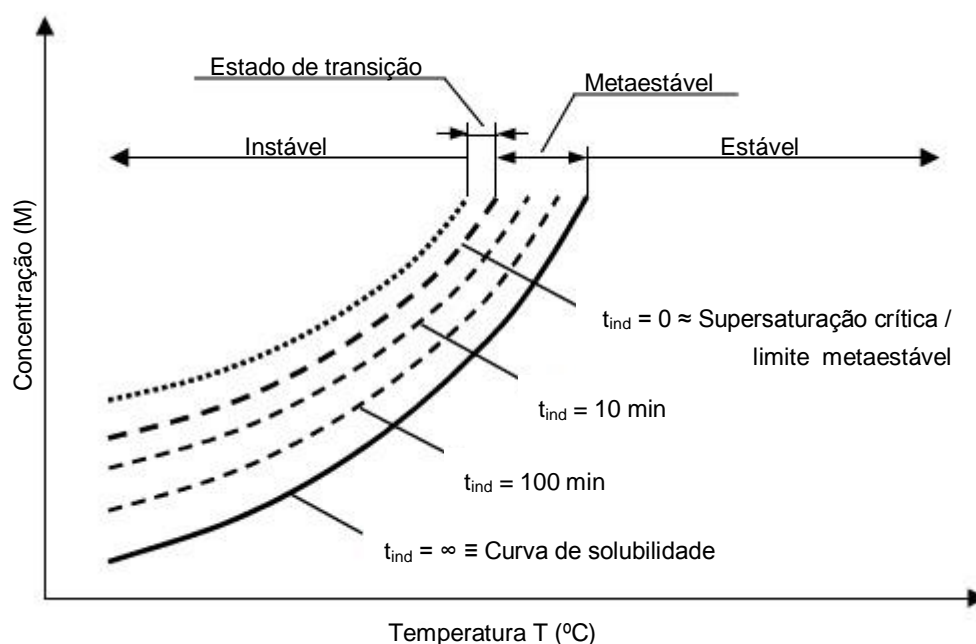


Figura 2.3 – Estados de concentração, adaptado [3].

### 2.1.3. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO

A meteorização causada pela cristalização de sais é uma das maiores causas de degradação de edifícios antigos. Existem dois tipos de degradação associados ao local onde a cristalização se processa. Por um lado, se a cristalização se processar à superfície dos materiais porosos, surgem as eflorescências, que se caracterizam por manchas esbranquiçadas que degradam os edifícios. Quando a cristalização ocorre em profundidade, ocorre o fenómeno de criptofluorescência, que implica a degradação da estrutura porosa do material sendo estruturalmente bastante danoso para o edifício e que pode implicar a desintegração parcial dos materiais, no caso das tensões desenvolvidas serem superiores à resistência mecânica do material. Dos mecanismos de degradação dos materiais porosos estudados destacam-se os três seguintes:

- Pressão de cristalização

Esta teoria baseia-se na ideia genericamente aceite de que o crescimento dos cristais em meios porosos provoca danos sobre as paredes dos poros. Pelo facto dos cristais se desenvolverem em espaços confinados, quando estes atingem o tamanho aproximado dos poros surgem forças repulsivas entre os

cristais e o material poroso em oposição ao crescimento normal dos cristais, promovendo tensões prejudiciais à estrutura porosa. Este mecanismo foi inicialmente estudado por Correns que em 1949 apresentou a equação ilustrada (equação 2.4) que possibilita o cálculo da pressão gerada pelo crescimento dos cristais em função das características dos sais e do estado de supersaturação da solução [5], [6], [7].

$$\Delta p = \frac{RT}{V_c} \ln \left( \frac{c}{c_s} \right) \quad (2.4)$$

De acordo com a formulação de Correns, quanto maior o rácio de supersaturação ( $c/c_s$ ), maior a pressão exercida pelos cristais sobre a rede porosa. Contudo, uma das críticas feitas a esta teoria prende-se com o facto de esta não considerar os efeitos da pressão na solubilidade dos sais que levariam a um decréscimo no rácio de supersaturação e consequentemente na pressão. Charola [7] refere que a equação de Correns é apenas aplicável a baixos valores de rácio supersaturação, uma vez que experimentalmente para rácios superiores a 1,2 observam-se erros significativos faces aos valores teóricos.

- Hidratação

A hipótese da hidratação foi sugerida por Mortensen em 1933. Esta teoria pretende explicar o desenvolvimento de pressões entre os cristais e a rede porosa através do aumento de volume observado no processo de hidratação de sais anidros. A base desta teoria assenta no pressuposto de que os sais anidros, devido à sua higroscopicidade, quando expostos a ambientes de elevada humidade relativa (HR) formam sais hidratados, podendo aumentar o seu volume consideravelmente. Um exemplo vulgarmente utilizado é o dos cristais de sulfato de sódio que no estado anidro ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) apresentam um volume molar de  $53 \text{ cm}^3/\text{mol}$ , embora como mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) o volume molar ascenda aos  $220 \text{ cm}^3/\text{mol}$ . No entanto, mais recentemente foi demonstrado experimentalmente que a transição dos cristais para um estado mais hidratado resulta da dissolução dos sais e posterior recristalização, sugerindo que a pressão resultante desta transição é, na verdade, explicada pela pressão de cristalização [5], [6], [7].

- Dilatação térmica diferencial

Esta teoria foi apresentada por Cooke e Smalley em 1968 e fundamenta-se na diferença entre os coeficientes de dilatação térmica do meio poroso e dos cristais para explicar as tensões existentes entre estes. A título de exemplo, o cristal anidro de cloreto de sódio, a halite, tem um coeficiente de dilatação térmica na ordem dos  $4,4 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , por outro lado o granito e o tijolo de burro apresentam, respetivamente, valores na ordem dos  $0,8 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  e  $0,6 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , o que implica variações volumétricas da halite muito superiores a estes dois materiais, provocando tensões no interior dos seus poros. As variações de temperatura entre o dia e a noite favorecem a degradação através deste mecanismo, no entanto, não explicam os danos provocados pelos sais a temperatura constante verificados experimentalmente [6].

#### 2.1.4. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO POROSO

A maior parte dos materiais estruturais de construção apresentam espaços vazios no seu interior, como é o caso dos tijolos, materiais pétreos, betão, argamassas... Estes espaços vazios, denominados poros,

apresentam uma enorme variabilidade das suas características, não só consoante as diferentes origens primárias dos materiais, mas também dependendo da forma como são produzidos os produtos finais, como por exemplo as proporções de água, cimento e areia das argamassas ou os métodos de cozedura dos materiais cerâmicos. A porosidade de um determinado material pode ser definida como a razão entre o volume de vazios e o volume total aparente (equação 2.5).

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V} \quad (2.5)$$

As características porosas dos materiais de construção têm uma influência determinante para os mecanismos de propagação da humidade. A rede porosa é o meio através do qual quer a água líquida quer o vapor de água se propagam. Para que o fluxo de água se verifique no interior dos materiais é necessário que os poros comuniquem entre si formando uma ligação na rede porosa, este tipo de porosidade é designada por porosidade aberta. Poderão existir, no entanto, poros isolados que não servem de meio para o fluxo de água e que definem a porosidade fechada [7], [8], [9]. Na figura 2.4 representam-se estes dois tipos de porosidade.

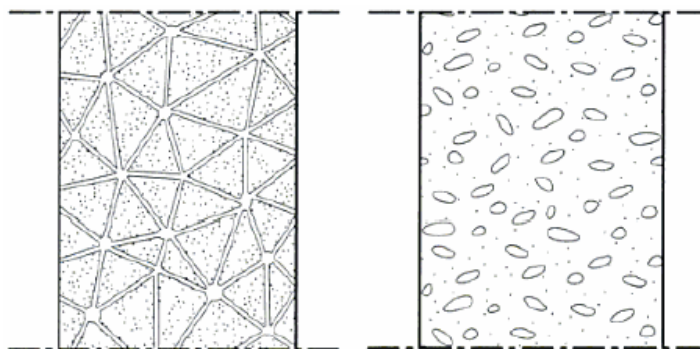


Figura 2.4 – Porosidade aberta (esquerda) e porosidade fechada (direita) [8].

Nem todos os poros estão acessíveis à água porque existe um meio preferencial para cada um dos estados físicos da mesma. Assim, os poros podem ser definidos de acordo com o seu tamanho e influência nas propriedades de transporte de humidade dos materiais. Desta forma podem classificar-se os poros em:

- microporos, são os mais pequenos e não têm influência no transporte de humidade. Devido à sua pequena dimensão, as forças capilares que se desenvolvem são tão elevadas que inviabilizam o movimento da água;
- mesoporos, são os de tamanho intermédio e os principais responsáveis pelo transporte de água líquida por capilaridade. Por essa razão, são vulgarmente denominados poros capilares. Também é possível observar o transporte de vapor de água nestes poros;
- macroporos, são os de maiores dimensões e constituem o principal meio de transporte de vapor de água. O transporte de água líquida nestes poros é pouco significativa porque as forças capilares são fracas [5], [10].

Dois parâmetros também utilizados para descrever os processos de transporte em meios porosos são a tortuosidade ( $\tau$ ) e a constrictividade ( $\delta$ ). A tortuosidade é definida pelo quociente entre o percurso

curvilíneo da rede porosa que uma partícula tem que percorrer para atravessar o material e a distância reta entre as faces opostas do material. A constrictividade está relacionada com a variação do diâmetro dos poros. Na figura 2.5 estão representados estes conceitos, os quais influenciam a difusão em meios porosos, nomeadamente de gases, como o vapor de água e iões em meios porosos embebidos em soluções [11], [12], [13].

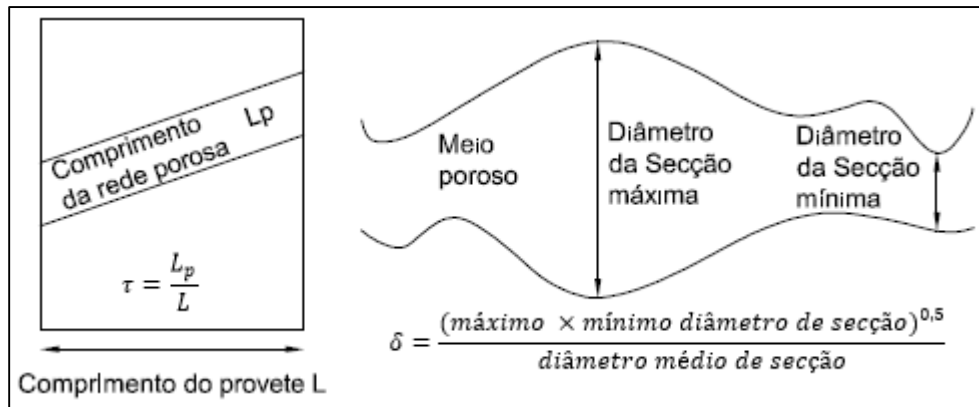


Figura 2.5 – Tortuosidade e constrictividade, adaptado [13].

Na figura 2.6 encontram-se resumidas as principais características do meio poroso.

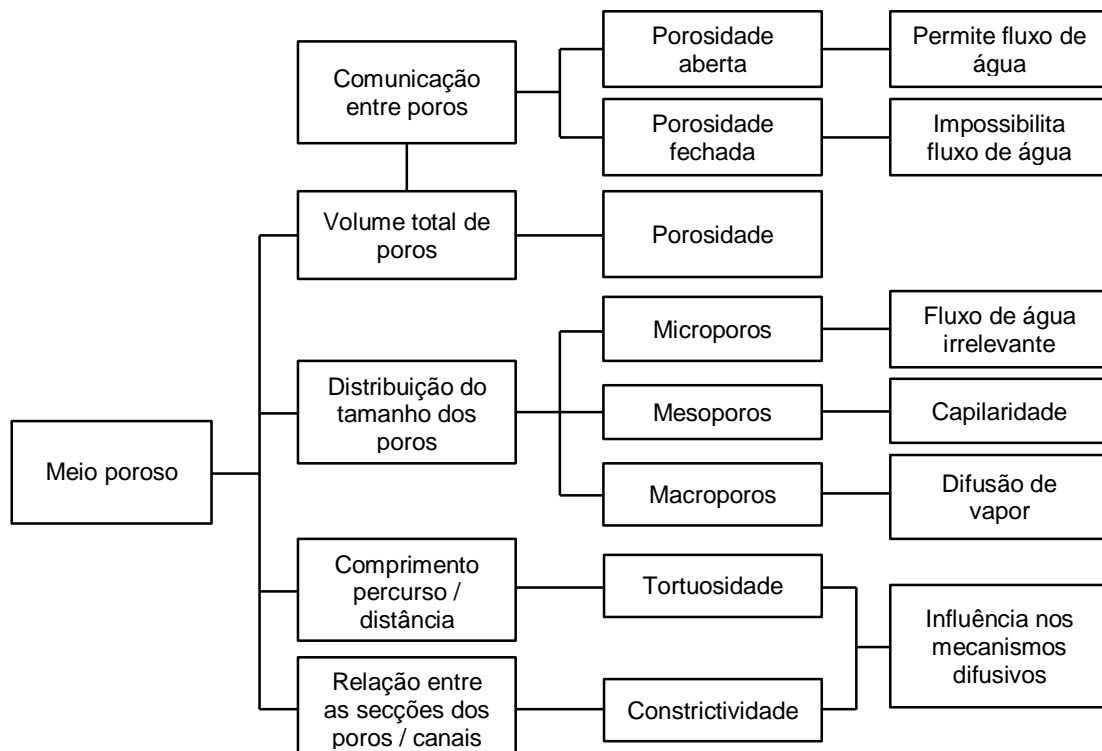


Figura 2.6 – Resumo da caracterização do meio poroso.

Existem vários estudos que vieram ajudar na compreensão do comportamento das soluções aquosas salinas, principalmente nas fases de cristalização/dissolução, em materiais porosos e a influência das suas características porosas nos mecanismos de degradação dos materiais.

De um modo geral, os poros de menores dimensões são mais afetados pelo mecanismo de cristalização dos sais. T. Gonçalves [5], sintetiza na sua dissertação alguns trabalhos que relacionam o tamanho dos poros com os danos provocados pela cristalização dos sais. A autora refere que Schaffer em 1932, apontava para a ideia de que os danos provocados pela cristalização dos sais são mais extensos em materiais com poros mais pequenos. Apesar do transporte das soluções ocorrer principalmente nos poros de maiores dimensões, segundo Rodriguez-Navarro e Doehe as soluções salinas são arrastadas para os poros de menores dimensões durante a secagem. Assim, a cristalização tende a ocorrer nestes poros, sendo que os de maior dimensão servem de reservatório de alimentação. Por outro lado, para Sherer a cristalização pode ter lugar em poros de maior e menor dimensão, este refere que em condições de equilíbrio quando o cristal está rodeado por uma película de solução é expectável o desenvolvimento de altas tensões apenas nos pequenos poros. No entanto quando esta película é interrompida, como pode acontecer durante a secagem, também podem ocorrer elevadas tensões nos poros maiores. A suportar esta teoria, estão os ensaios laboratoriais realizados por Zehnder e Arnold em 1989, onde observaram a cristalização em grandes poros (1 a 10  $\mu\text{m}$ ) de provetes de tijolo e argamassas [5].

#### 2.1.5. HIGROSCOPICIDADE

A higroscopicidade é um mecanismo de fixação de humidade que corresponde à capacidade que os materiais têm de atrair as moléculas de água presentes no ar da ambiência, variando o seu teor de água em função da HR do ar. A maioria dos materiais usados na construção civil são higroscópicos sendo o seu grau de higroscopicidade variável. Por exemplo, a madeira em geral é um material bastante higroscópico enquanto o tijolo burro é pouco higroscópico [5], [8].

Os sais, por sua vez, também possuem um comportamento higroscópico. Em boa verdade, a generalidade dos sais solúveis apresentam um nível de adsorção de humidade elevado e bastante superior ao verificado nas argamassas, tijolos e a maioria dos materiais pétreos. Para além de higroscópicos, os sais também são deliquescentes, ou seja, quando os seus cristais adsorvem a humidade do ar, mudam de estado físico, diluindo-se nas moléculas de água adsorvidas e formando soluções aquosas salinas. Por estes motivos, a variação da HR do ar tem uma influência determinante nos ciclos de cristalização/dissolução que provocam evidentes danos nos materiais porosos [5], [7], [14].

A HR corresponde à relação entre a pressão de vapor de água no ar e a pressão de vapor de água sobre uma superfície lisa de água à mesma temperatura. Quando as trocas de moléculas de água entre o ar e a superfície de água se encontram em equilíbrio a uma dada temperatura constante atinge-se a humidade relativa de equilíbrio ( $HR_{eq}$ ). A  $HR_{eq}$  sobre uma superfície lisa de água pura é de 100% a qualquer temperatura. No entanto, nas soluções aquosas salinas, dependendo da concentração, da temperatura e do tipo de sais dissolvidos, o valor de  $HR_{eq}$  é variável e inferior aos 100%. Isto deve-se à menor pressão de vapor de água das soluções aquosas salinas, estas têm maior tendência de condensar o vapor de água da ambiência para atingir o equilíbrio [5], [7].

Posto isto, facilmente se percebe a influência da HR da ambiência nos ciclos de cristalização/dissolução dos sais. Considerando  $HR_{eq}$  de um dado sal a sua humidade relativa de equilíbrio, se:

- $HR < HR_{eq}$ , caso o sal se encontre dissolvido, verifica-se a evaporação de moléculas de água da solução, levando a solução a um estado de supersaturação e consequente cristalização dos sais.



Se o sal já se encontrar cristalizado, este é incapaz de adsorver a humidade do ambiente que o rodeia;

- $HR = HR_{eq}$ , verifica-se evaporação caso a solução esteja não saturada até se atingir a saturação e o equilíbrio de pressões. No caso dos cristais, estes tendem a dissolver-se e a formar uma solução saturada;
- $HR > HR_{eq}$  verifica-se a dissolução dos sais e/ou o aumento do solvente e consequente diluição da solução. Para um valor de HR de 100% a solução tende para um estado infinitamente diluído [5].

Na tabela 2.1 encontram-se representados os valores da  $HR_{eq}$ , à temperatura de 20 °C, de alguns dos sais mais comuns.

Tabela 2.1 –  $HR_{eq}$  de alguns dos sais mais comuns à temperatura de 20 °C, adaptado [15].

Sais		$HR_{eq}$ (%)
NaCl	Cloreto de sódio	75,47
KCl	Cloreto de potássio	85,11
NaNO <sub>3</sub>	Nitrato de sódio	75,36
KNO <sub>3</sub>	Nitrato de potássio	94,62
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de potássio	97,59
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonato de potássio	43,16
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de sódio	93,60
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonato de sódio	91,60
CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	Sulfato de cálcio	99,60

## 2.2. TRANSPORTE DE HUMIDADE

### 2.2.1. INTRODUÇÃO

O transporte de humidade em materiais porosos processa-se através de vários fenómenos podendo ocorrer sob a forma de vapor de água ou de água líquida. O transporte de vapor de água nos materiais de construção é condicionado por processos difusivos e por movimentos convectivos no interior dos poros. Por sua vez, o transporte de água na fase líquida pode ser explicado pelos fenómenos de capilaridade, difusão térmica, eletrocinética, fluxo hidráulico e pelo efeito da gravidade. Contudo, muitos destes fenómenos envolvem o transporte de humidade em quantidades pouco relevantes. Os processos difusivos devem-se essencialmente à existência de gradientes de temperatura (difusão térmica ou efeito Soret) e de pressão de vapor de água (difusão gasosa propriamente dita). A difusão térmica, que também ocorre na fase líquida, representa apenas cerca de 0,05% do valor total de transferência de humidade nos edifícios, podendo por isso ser desprezada. Este fenómeno não deve ser confundido com a influência da temperatura nos valores da pressão de vapor de água de saturação. Os movimentos convectivos também costumam ser negligenciados devido à dificuldade de determinação da pressão do ar em torno do edifício e à sua reduzida influência em condições normais. Em relação à eletrocinética, atualmente não existe um conhecimento pormenorizado da sua influência, sendo apenas referido que

promove um aumento no fluxo de água [16]. A influência da gravidade no transporte de água está limitada a poros de grandes dimensões ( $>10^{-6}$  m) e por isso pode ser desprezada para a maioria dos materiais de construção. Os fenómenos que acabam por promover a maior parte do transporte de humidade nos materiais porosos são a capilaridade e a difusão [16], [17].

### 2.2.2. TRANSPORTE DE ÁGUA NA FASE LÍQUIDA

A capilaridade é um importante mecanismo de transporte de humidade na fase líquida que se traduz na capacidade do líquido atravessar o meio poroso sem a ajuda de forças externas como a gravidade. Este é o mecanismo que explica a ocorrência do fenómeno da humidade ascensional nos edifícios, na qual a água proveniente do solo ascende através das paredes, pilares e/ou pavimentos devido às forças atrativas que se geram entre o líquido e o material sólido, sobrepondo-se às forças coesivas do líquido e à ação gravítica [5], [8]. Na figura 2.7 encontra-se representada a humidificação de um material poroso por capilaridade.

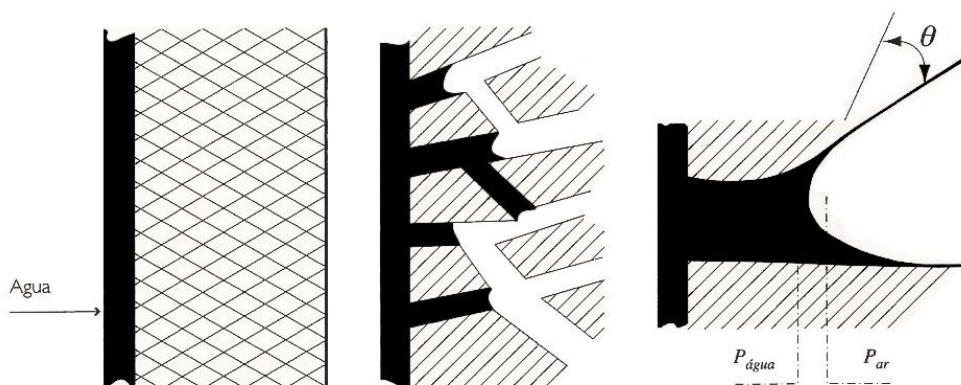


Figura 2.7 – Transporte de água por capilaridade [8].

A formação de interfaces curvas entre o líquido e o ar presente no meio de propagação provoca a ascensão da água por capilaridade, sendo nestas interfaces que se desenvolve a pressão capilar. O cálculo da pressão capilar é possível através da lei de Jurin (equação 2.6), contudo esta é apenas aplicável a tubos cilíndricos. Nesta equação  $p_c$  (Pa) representa a pressão capilar,  $\sigma$  (N/m) a tensão superficial do líquido,  $r$  (m) o raio de curvatura principal e  $\theta$  o ângulo de contacto [5].

$$p_c = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} \quad (2.6)$$

O ângulo de contacto corresponde ao ângulo formado entre a superfície líquida e a superfície sólida. Na superfície de um material hidrófugo este ângulo atinge valores superiores a  $90^\circ$ , em contrapartida numa superfície hidrófila este não ultrapassa os  $90^\circ$ , como se encontra ilustrado na figura 2.8 [5].

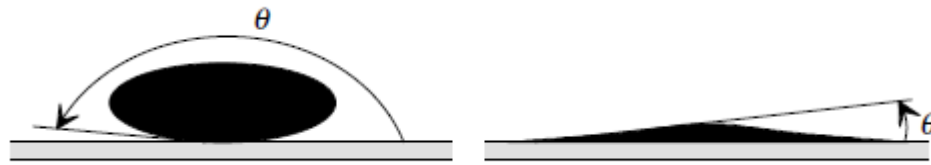


Figura 2.8 – Representação do ângulo de contacto entre o líquido e superfície hidrófugas e hidrófilas [18].

Se por um lado a pressão capilar possibilita a ascensão capilar da água em tubos cilíndricos, o peso da coluna de água tende a equilibrar o valor das pressões, impedindo a subida da água quando estes dois valores se igualam. A pressão exercida pela coluna de água ( $p$ ) que iguala a pressão capilar está representada na equação 2.7, onde  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) representa o peso volúmico da água,  $g$  ( $\text{m/s}^2$ ) a constante gravitacional e  $H_0$  (m) a altura de ascensão capilar em condições de equilíbrio. O sinal negativo que aparece na equação indica que esta pressão é contrária à pressão capilar, como foi referido [5].

$$p = -\rho \cdot g \cdot H_0 \quad (2.7)$$

Atingido o estado de equilíbrio onde as duas forças se anulam, obtém-se a altura máxima de ascensão capilar  $H_0$  combinando as duas equações anteriores. Na equação 2.8 verifica-se que a altura máxima atingida pela frente húmida é inversamente proporcional ao raio do tubo, algo que seria expectável uma vez que o mesmo se observa em relação à pressão capilar [5].

$$p_c + p = 0 \Leftrightarrow H_0 = \frac{2 \cdot \sigma}{r \cdot \rho \cdot g} \cdot \cos \theta \quad (2.8)$$

Para calcular a distância, em metros, percorrida pela água em função do tempo, em segundos, em tubos cilíndricos, recorre-se à equação de Washburn (equação 2.9), desenvolvida a partir da lei experimental de Poiseuille. A distância percorrida segundo a equação de Washburn depende não só dos valores da tensão superficial da água, do ângulo de contacto e do raio do tubo mas também da viscosidade dinâmica da água  $\eta$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) [5].

$$d(t) = \sqrt{\frac{\sigma \cdot r \cdot \cos \theta}{2\eta} \cdot t} \quad (2.9)$$

Porém, devido à complexidade da rede porosa dos materiais de construção, a utilização desta equação idealizada para tubos cilíndricos verticais não é possível. Para materiais porosos é necessária uma abordagem macroscópica do transporte da água líquida. As equações 2.10 e 2.11 permitem a descrição da quantidade de água absorvida e da altura de ascensão da água à escala dos materiais de construção porosos. Ambas as equações derivam da equação de Washburn, sendo a quantidade total absorvida ( $W$ ) e a altura de ascensão capilar ( $H$ ) diretamente proporcionais à raiz quadrada do tempo. Os coeficientes  $A$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$ ) e  $B$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$ ) designam-se coeficiente de absorção capilar de água e coeficiente de

penetração capilar, respetivamente. Assim, estes coeficientes caracterizam a capacidade de transporte de água dos materiais. Contudo, há também que considerar os valores iniciais de  $w_0$  e  $h_0$  que mesmo em provetes secos em estufa são observados [5].

$$W(t) = A \cdot \sqrt{t} + w_0 \quad (2.10)$$

$$H(t) = B \cdot \sqrt{t} + h_0 \quad (2.11)$$

Um dos objetivos da componente laboratorial deste trabalho será precisamente o de calcular empiricamente os coeficientes de absorção capilar (A) da água com diferentes sais dissolvidos em provetes de tijolo, assunto abordado com maior detalhe no capítulo 4.

### 2.2.3. TRANSPORTE DE ÁGUA NA FASE DE VAPOR

O transporte de vapor de água nos materiais de construção é condicionado pelos processos difusivos e pelos movimentos convectivos no interior dos poros. A difusão de vapor de água em materiais porosos pode ser explicada pela existência de gradientes de pressão de vapor de água e de temperatura. No entanto, Janssen [19], após a análise de vários estudos relacionados com a difusão de vapor de água, concluiu que a influência dos gradientes de temperatura na difusão de vapor de água pode ser negligenciada.

Assim, a difusão de vapor de água implica a existência de um gradiente de concentração de vapor de água que promove o fluxo de moléculas de água para locais onde a concentração de vapor de água seja inferior até se obter uma homogeneização da concentração. O fenómeno da difusão pode ser explicado pelas leis de Fick. A equação 2.12 corresponde à primeira lei de Fick que define o fluxo de difusão  $j$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) em função do coeficiente de difusão  $D_v$  ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ) e do gradiente de concentração  $\nabla c$  ( $\text{kg.m}^{-4}$ ) [05].

$$\vec{j} = -D_v \cdot \vec{\nabla} c \quad (2.12)$$

Assim, assumindo que o ar se comporta como um gás ideal (equação 2.13), o fluxo de difusão de vapor de água no ar pode ser representado pela equação 2.14.

$$p_v = \frac{c_v \cdot R \cdot T}{M_w} \quad (2.13)$$

$$\vec{j} = -\delta_v \cdot \vec{\nabla} p_v \quad (2.14)$$

Nos materiais porosos a difusão de vapor de água também se processa através do ar presente nos poros mas não depende apenas da interação entre as moléculas de vapor de água. Pelo facto do vapor de água se difundir num meio de reduzidas dimensões, as suas moléculas colidem com as paredes dos poros

(difusão de Knudsen) [16]. Considerando ainda os efeitos de adsorção e a tortuosidade do meio poroso provoca uma significativa diminuição do fluxo de difusão. Deste modo, deve ser tido em conta um fator de resistência à difusão de vapor de água adimensional  $\mu$  [5], [16], [20]. Este parâmetro varia apenas de acordo com o tipo de material de propagação e as suas características porosas, sendo independente das variações térmicas e do teor de humidade para baixos valores do mesmo. Para elevados teores de humidade do material, a presença de água líquida na rede porosa pode acelerar o transporte de vapor de água, uma vez que a água líquida tende a diminuir o comprimento do percurso efetivo para a difusão do vapor de água. O coeficiente de permeabilidade ao vapor de água  $\Pi$  ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ ) de um determinado material corresponde, desta forma, ao quociente entre o coeficiente de difusão de vapor de água no ar e o fator de resistência ao vapor de água. O fluxo de difusão em materiais porosos pode então ser calculado através da equação 2.15 [5].

$$\vec{j} = -\frac{\delta_v}{\mu} \cdot \vec{\nabla} p_v = -\Pi \cdot \vec{\nabla} p_v \quad (2.15)$$

#### 2.2.4. SECAGEM

A secagem dos materiais porosos será abordada de forma muito sucinta uma vez que este mecanismo não será objeto de estudo prático neste trabalho. Interessa, assim, apenas perceber que a secagem a partir do estado de saturação do material com apenas uma frente de secagem é caracterizada pelas seguintes fases:

- Fase I – Uma vez que inicialmente o material se encontra saturado, subsiste uma continuidade da água líquida na rede porosa e o transporte desta até à superfície superior é essencialmente efetuado através da capilaridade devido à elevada pressão capilar que se existe na superfície. A evaporação dá-se desta forma à superfície, diminuindo o teor de humidade do material. É consensualmente aceite que a taxa de secagem nesta fase deve-se apenas a fatores externos como a HR, a temperatura e a velocidade do ar. É expectável que nesta fase exista no material uma distribuição homogênea de humidade e que a taxa de secagem seja constante, verificando-se uma diminuição linear do teor de humidade;
- Fase II – Esta fase inicia-se quando o fluxo capilar deixa de ser suficiente para compensar a quantidade de água que se evapora, provocando uma regressão da frente húmida. O transporte de humidade para a superfície do material dá-se através da difusão de vapor acima da frente húmida e por capilaridade abaixo da frente húmida. A regressão da frente húmida corresponde a uma quebra na continuidade do líquido nos poros próximos da superfície e à medida que esta evolui, o teor de água na zona húmida vai diminuindo progressivamente;
- Fase III – Quando se verifica a descontinuidade do líquido abaixo da zona húmida inicia-se a terceira e última fase de secagem. Esta fase é caracterizada pelo transporte de humidade sob a forma de vapor em todo o material. Apesar do material se apresentar tecnicamente seco, existe ainda humidade principalmente nos poros de menores dimensões. O teor de humidade diminui mais lentamente assim como a taxa de secagem até o material atingir o equilíbrio higroscópico [5].

Na figura 2.9 encontram-se graficamente representadas estas três fases.

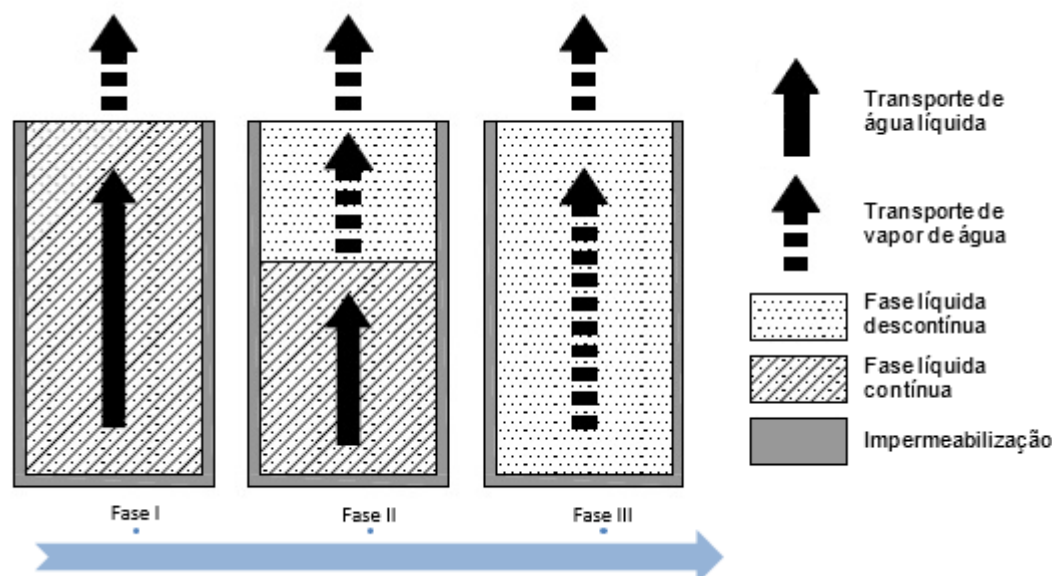


Figura 2.9 – Secagem unidirecional de materiais porosos.

### 2.3. A ORIGEM DOS SAIS NOS EDIFÍCIOS

A presença de sais solúveis no património edificado é um facto que promove a questão da sua origem. Não obstante o facto de grande parte dos estudos nesta matéria se restringirem à ação individual de alguns sais, na realidade coexiste uma grande variedade dos mesmos nos elementos que compõem os edifícios, não sendo por vezes fácil de os detetar individualmente.

Um dos principais indicadores do tipo de sais que se podem encontrar nos materiais porosos dos edifícios é a sua localização geográfica. A água do mar contém concentrações muito significativas de sais dos quais predominam os iões de sódio ( $\text{Na}^+$ ) e cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), formando grandes quantidades cristalinas de cloreto de sódio aquando da evaporação das moléculas de água. Por este motivo, edifícios próximos da zona costeira têm maior tendência para apresentar este tipo de iões na rede porosa dos seus materiais. Associado também à localização geográfica, as atividades económicas predominantes numa determinada região podem ser um forte indicador do tipo de iões a encontrar. Por exemplo o setor primário, em particular a agricultura, pode estar na origem de alguns sais como os nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), estes provenientes de fertilizantes orgânicos, excrementos de animais e outro tipo de matéria orgânica em decomposição. Por outro lado, nas regiões mais industrializadas, as chuvas ácidas originadas pela poluição atmosférica são uma das possíveis causas para explicar a presença de iões sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Para além destes fenómenos mais abrangentes, outras formas de penetração de sais nos materiais porosos de origem humana podem ser observados dependendo da cultura e dos costumes, do tipo de consumo e das condições climáticas de diferentes países/regiões [5].

A tabela 2 apresenta, de forma sucinta, algumas das principais origens possíveis de diferentes aniões encontrados em edifícios.

Tabela 2.2 – Origem dos principais aniões, [21] adaptado de [5].

Sal	Origem
Sulfatos, $\text{SO}_4^{2-}$	Poluição atmosférica (chuvas ácidas), solos fertilizados, materiais cerâmicos
Cloretos, $\text{Cl}^-$	Água do mar (quer por ação direta, quer através de salpicos, brisa ou nevoeiro marítimo, ou ainda através de solos contaminados), produtos salgados armazenados nos edifícios, contaminação de solos com resíduos domésticos
Nitratos, $\text{NO}_3^-$	Solos (utilização de fertilizantes orgânicos), excrementos de animais, matéria orgânica em decomposição
Carbonatos, $\text{CO}_3^{2-}$	Reação química, na presença de água, entre os álcalis presentes, por exemplo, nas argamassas à base de cimento e o $\text{CO}_2$ da atmosfera

Na figura 2.10 apresenta-se um exemplo de eflorescências causadas por sais na face inferior de uma laje de betão que divide dois pisos de um parque de estacionamento de um hotel em Otava, no Canadá. Este é um hipotético caso em que o aparecimento dos sais tem origem na ação humana uma vez que estes presumivelmente provêm dos veículos, devendo-se à prática comum da utilização de cloreto de sódio e cloreto de cálcio na manutenção das estradas da cidade durante as tempestades de neve. Segundo dados disponibilizados pela entidade governamental de Otava, cerca de 175000 toneladas destes sais foram utilizadas para garantir o degelo das estradas do município em 2013. Como consequência desta intensiva utilização de cloreto de sódio e de cálcio, tem-se observado patologias associadas à cristalização destes sais em edifícios mais antigos, particularmente em caves dos mesmos [22], [23].



Figura 2.10 – Eflorescências na superfície inferior de uma laje de betão em Otava, Canadá [24].



As figuras 2.11 a) e b) evidenciam danos causados por sais provenientes maioritariamente da água do mar. A fotografia da esquerda é um exemplo de degradação das paredes exteriores de um edifício em Veneza, Itália, cidade onde todos os edifícios antigos mantêm as suas fundações submersas na água salina proveniente do mar Adriático. Na imagem verifica-se que há desintegração do reboco e até do tijolo subjacente devido a criptoflorescências. O trabalho realizado por Collepardi *et al.* [24] na observação da degradação imposta pela ação dos sais nos edifícios de Veneza refere que se verificou acensão capilar de até 3 metros de altura em relação ao solo, e elevadas concentrações de sais, principalmente dos iões cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e sódio ( $\text{Na}^+$ ), mas também de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), entre outros com menor predominância.

A figura 2.11 b) revela a degradação provocada pelos sais num edifício em Adelaide, na Austrália. Os estudos de Lopez-Arce *et al.* [25] mostram que o caso da cidade de Adelaide é um dos mais impressionantes sobre este tema, considerando-a um laboratório natural para o estudo do ataque dos sais a edifícios históricos. Até à data do trabalho desenvolvido (2008), o *Adelaide City Council* financiou parcialmente reparações de mais de 400 edifícios devido à degradação causada pela presença de sais na humidade ascensional.

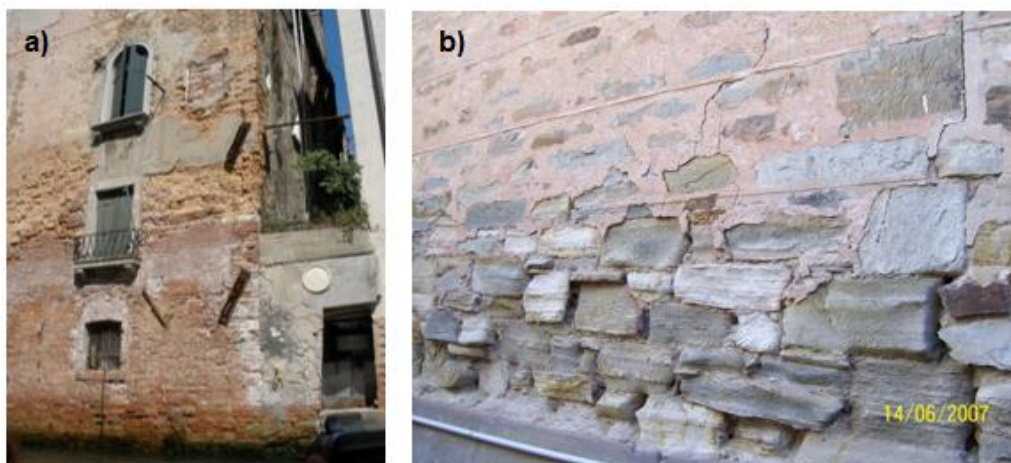


Figura 2.11 – a) Degradação causada por sais de edifício em Veneza, Itália e b) degradação de edifício em Adelaide, Austrália.

Nas figuras 2.12 apresentam-se dois exemplos de degradação provocada pela ação dos sais solúveis em Portugal, observados por T. Gonçalves [5]. Na imagem da esquerda é possível observar a arenização da argamassa de cal de recobrimento de uma parede de alvenaria de tijolo do Moinho de Maré de Corroios. A imagem da direita apresenta o fenómeno de eflorescência e o destacamento da pintura de uma parede da ala sul, no Mosteiro de Alcobaça.





Figura 2.12 – Desintegração da argamassa de reboco, Moinho de Maré de Corroios (esquerda) e Eflorescências com destacamento da pintura, Mosteiro de Alcobaça (direita) [5].

## **2.4. SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS SELECIONADAS**

Como foi referido no capítulo introdutório, a campanha experimental a efetuar envolve o estudo da influência de duas variáveis nos ensaios de absorção dos provetes, sendo estas os sais e as diferentes interfaces. Como tal, e tendo em conta o limite temporal imposto e o elevado número de provetes a ensaiar para o desenvolvimento deste trabalho, considerou-se que apenas seria possível ensaiar dois tipos de soluções salinas para além da água. Foi por isso necessária uma criteriosa escolha dos sais a utilizar, tendo esta recaído sobre o sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e o cloreto de potássio ( $\text{KCl}$ ).

A opção pelo sulfato de sódio justifica-se pela danosa atuação do mesmo nos materiais porosos dos edifícios. Vários autores referem mesmo que este é um dos sais que maior degradação causa nos edifícios [05], [26], [27], [28]. Para além de promover facilmente o aparecimento de eflorescências nas superfícies exteriores, o sulfato de sódio também é um dos principais causadores de subflorescências, levando à desintegração de material devido às elevadas pressões que os cristais exercem sobre as paredes da rede porosa.

O segundo sal escolhido procurou garantir a franca presença nos materiais e componentes dos edifícios. A escolha óbvia seria a do cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) pela abundância dos seus iões nos mares e oceanos que são provavelmente a maior causa das patologias abordadas neste capítulo. No entanto optou-se pelo cloreto de potássio face a alguns resultados interessantes observados nos ensaios realizados por de J. Azevedo [21], como o facto de se ter obtido valores de coeficiente de capilaridade nos ensaios com solução de cloreto de potássio superiores aos obtidos nos ensaios de referência (com água pura), e devido à interessante cristalização obtida após a secagem dos provetes. Assim, manteve-se o ensaio com iões de cloreto que são frequentemente encontrados nos edifícios, acrescentando uma componente comparativa mais relevante. Caso se confirme o aumento do coeficiente de capilaridade nos ensaios com cloreto de potássio face aos ensaios com água pura, será ainda interessante avaliar o comportamento desta mesma solução em provetes que não monolíticos e para diferentes interfaces. O estudo sobre os tipos de interface, contacto hidráulico, contacto perfeito e espaço de ar, será apresentado no capítulo 3.

O trabalho realizado por J. Azevedo [21] sobre a absorção por capilaridade de soluções salinas em materiais porosos permite perceber com bastante rigor o comportamento de diferentes soluções salinas, nomeadamente de soluções saturadas de sulfato de sódio e de cloreto de potássio, nos ensaios de

capilaridade por imersão parcial de provetes monolíticos de materiais porosos, particularmente do tijolo, um dos materiais ensaiados pela autora e que será igualmente objeto de estudo no presente trabalho. Uma importante conclusão a que chegou J. Azevedo [21] foi a de que seis diferentes sais ensaiados influenciam o coeficiente de capilaridade tendo-se verificado variações que vão até aos 46% face ao valor de referência (ensaio com água pura). Nos ensaios realizados pela autora observou-se um decréscimo do valor do coeficiente de capilaridade nos ensaios realizados com soluções de sulfato de sódio face aos valores de referência, ao passo que com cloreto de potássio se observa o inverso. A tabela 2.3 demonstra isso mesmo.

Tabela 2.3 – Valores do coeficiente de capilaridade médio em provetes de tijolo, adaptado de [21].

Soluções	Coeficiente de capilaridade ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ )	Amostra	Diferença face à referência (%)
Água	0,1448	2	0%
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	0,1159	2	-19,96%
KCl	0,1673	3	+15,54%

O valor do coeficiente de capilaridade  $A$  (equação 2.10) é expresso em  $(\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2}))$  e corresponde ao declive do primeiro troço linear reto da curva obtida no ensaio de absorção por capilaridade. A figura 2.13 apresenta uma representação grosseira do que se espera obter nas curvas de absorção por capilaridade em provetes monolíticos imersos em soluções saturadas de sulfato de sódio, cloreto de potássio e em água.

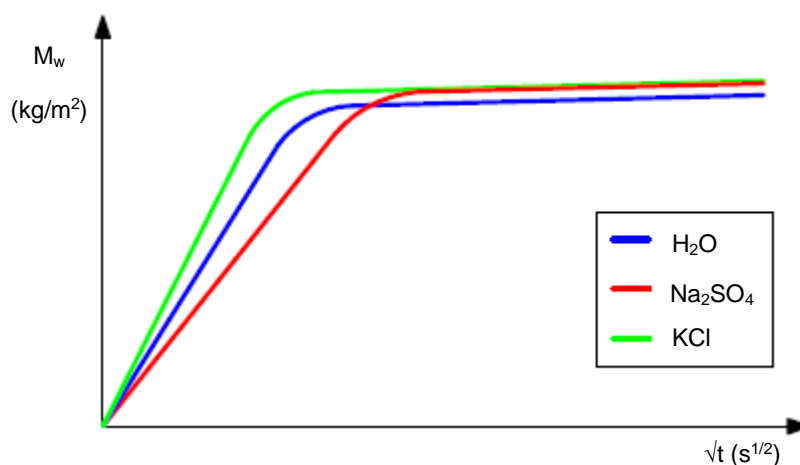


Figura 2.13 – Estimativa das curvas de absorção capilar obtidas nos ensaios.

## **2.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO**

A maioria dos materiais utilizados na indústria da construção apresenta características porosas que favorecem a fixação e o transporte de humidade. O transporte de humidade em materiais porosos processa-se essencialmente na fase líquida por capilaridade, e na fase de vapor através da difusão de vapor de água.

A humidade associada à presença de sais solúveis nos materiais de construção pode conduzir a uma severa degradação dos mesmos. Os sais dissolvidos na água não representam por si só um risco para os edifícios, no entanto, a sua cristalização aquando da evaporação da água é considerada um dos principais mecanismos de degradação dos materiais porosos.

Uma das características dos sais que os torna tão ofensivos é o facto de estes serem deliquescentes, levando a que ocorra a alteração do seu estado físico com a variação da HR do ar. Deste modo, estão sujeitos a ciclos de cristalização/dissolução induzidos por oscilações climáticas, provocando graves danos nos edifícios a longo prazo. Se a cristalização dos sais ocorrer na superfície exterior dos elementos construtivos, observa-se o fenómeno de eflorescência caracterizado por manchas brancas que surgem devido ao depósito de cristais na superfície do elemento. Caso a cristalização ocorra no interior da estrutura porosa dos materiais, podem gerar-se elevadas pressões nas paredes dos poros que conduzem à desintegração do material, pondo em causa a resistência estrutural dos edifícios. A degradação causada pelos sais depende também do tipo de sal, uma vez que estes apresentam diferentes valores  $HR_{eq}$ , bem como distintas formas cristalinas.

Relativamente à sua origem, os sais podem surgir de diferentes fontes, assim em alguns casos é possível associar a origem dos sais a alguns indicadores como a localização geográfica e ao desenvolvimento e costumes das populações.

Um dos parâmetros que permite caracterizar a cinética de embebição de materiais porosos é o coeficiente de capilaridade. Na campanha experimental serão calculados estes coeficientes para provetes embebidos em água e em duas soluções aquosas salinas saturadas. Para este efeito foram seleccionados o sulfato de sódio e o cloreto de potássio.



# 3

## ANÁLISE DO FENÓMENO DE INTERFACE

### 3.1. INTRODUÇÃO

Os sistemas construtivos envolvem a utilização não de apenas um, mas sim de um conjunto de diferentes materiais por forma a satisfazer as exigências estruturais e de conforto, entre outras. A maioria dos edifícios existentes, mesmo os mais antigos, são constituídos por elementos compostos por várias camadas dispostas vertical e horizontalmente, com diferentes características. Esta heterogeneidade torna o estudo dos mecanismos de transferência de humidade mais complexo e exige o conhecimento do desempenho dos materiais não só isoladamente mas no seu conjunto.

No âmbito deste estudo destaca-se a construção em alvenaria. Este é um dos sistemas construtivos mais antigos utilizado atualmente e consiste na sobreposição de unidades base ligadas entre si por argamassa. Ao longo dos anos, a alvenaria sofreu aperfeiçoamentos e diferentes tipos de materiais foram sendo utilizados como unidade básica da alvenaria, desde materiais pétreos de diferentes tipos, cerâmicos e blocos de betão, assim como diferentes tipos de argamassa foram surgindo, com a evolução das exigências construtivas. Só a partir do século XIX, com o aparecimento do cimento Portland e os refinamentos na produção do aço, a utilização da alvenaria como base estrutural dos edifícios começou a entrar em declínio. De acordo com o exposto, é possível referir que a maior parte do edificado histórico português foi construído em alvenaria.

Grande parte dos estudos existentes sobre o transporte de água em elementos compostos, ao nível da interface restringe-se ao meio de propagação constituído por solos, reservando uma pequena parte para os materiais porosos, em particular os materiais de construção. Apesar da aparente semelhança entre ambos, o transporte de água processa-se de forma distinta para cada um. Nos solos os poros têm grandes dimensões quando comparados com os materiais porosos usados na construção, pelo que uma das diferenças corresponde à influência da gravidade no transporte de água nos dois meios. Nos solos, é a gravidade que promove a infiltração da água, ao contrário nos materiais de construção, devido às reduzidas dimensões dos poros, a capilaridade é um mecanismo de transporte de água fundamental. Nos materiais porosos as forças capilares são muito superiores à gravítica, pelo que esta última pode na maior parte dos casos ser negligenciada na maioria dos casos.

Neste capítulo procura-se sintetizar a informação mais relevante relativa ao transporte de água em materiais porosos compostos onde existe uma descontinuidade no transporte de água provocada pela existência de uma interface entre os materiais. Se por um lado existem diferentes tipos de interface, por outro lado, cada uma delas contribuirá de forma distinta para uma alteração do transporte de água, aquando da sua passagem relativamente a um elemento monolítico.

### 3.2. TIPOS DE INTERFACE

Genericamente podem-se considerar três tipos de configurações de contacto, como ilustra a figura 3.1:

1. o contacto hidráulico onde existe interpenetração da estrutura porosa das duas camadas;
2. o contacto natural perfeito onde ocorre contacto físico entre as duas camadas mas sem interpenetração da estrutura porosa;
3. o espaço de ar entre camadas onde se garante existir um espaço de ar de alguns milímetros a separar as duas camadas.

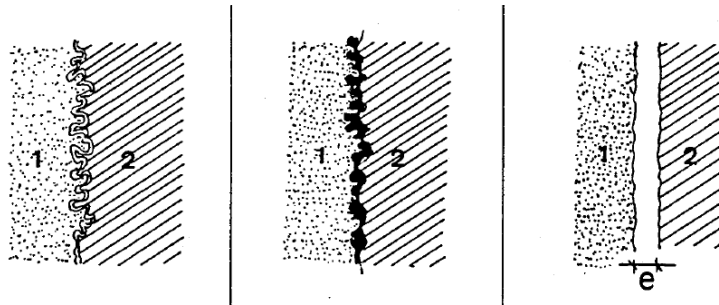


Figura 3.1 – Tipos de configurações de contacto: contacto hidráulico (esquerda), contacto perfeito (centro) e espaço de ar (direita) [22].

#### 3.2.1. CONTACTO HIDRÁULICO

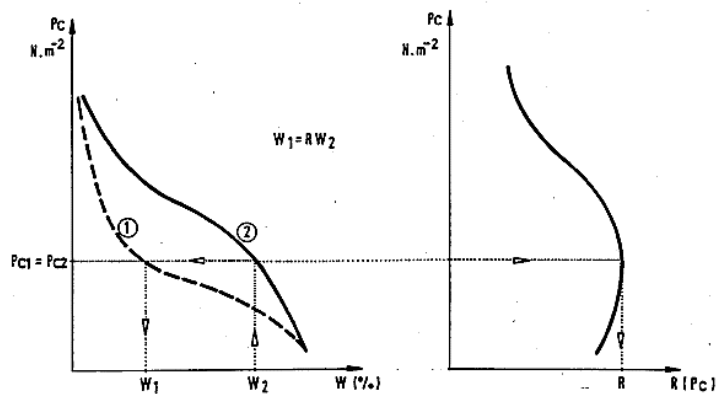
Alguns autores abordam este tipo de interface apenas na sua execução teoricamente perfeita, ou seja, quando se obtém uma continuidade hidráulica entre dois materiais. Na prática dificilmente se verifica essa perfeição.

O contacto hidráulico perfeito é caracterizado por uma interpenetração porosa perfeita entre dois materiais de tal modo que se os materiais forem idênticos comportar-se-ão como uma estrutura monolítica, não se verificando perturbações na interface entre camadas. Quando os materiais são diferentes a pressão capilar assumirá o mesmo valor a montante e a jusante da interface. No entanto o teor de humidade dos dois materiais será diferente, variando consoante as suas características porosas e o valor de pressão capilar (como se pode verificar no gráfico do lado esquerdo da figura 3.2). Ainda assim, a igualdade da pressão capilar permite estabelecer uma relação entre os valores do teor de humidade dos dois materiais na interface ( $w_1 = R \times w_2$ ). A figura 3.2 exemplifica o artifício de cálculo que pode ser utilizado para se obter essa relação [29].

Esta configuração é caracterizada pela continuidade da pressão capilar ( $p_c$ ) e do fluxo de humidade ( $q$ ) através da interface (equação 3.1 e 3.2) [29].

$$p_{c,ch1}(w_1) = p_{c,ch2}(w_2) \quad (3.1)$$

$$q_{ch1} = q_{ch2} \quad (3.2)$$


 Figura 3.2 – Princípio de cálculo da relação  $R(p_c)$  [29].

Quando uma argamassa fresca é colocada em contacto com um material poroso seco, como por exemplo o tijolo, cria-se uma interface de contacto hidráulico real. Após a colocação da argamassa fresca entre os dois tijolos, parte da água presente na argamassa é absorvida pelo tijolo, arrastando também pequenas partículas de argamassa para a sua rede porosa. Esta migração de água provoca uma diminuição no rácio água/cimento da argamassa próxima da interface durante a cura, resultando em diferentes características porosas, bem como de transporte de humidade dessa argamassa. Desta forma, deixa de se verificar a presença uma interface passando-se a ter uma zona “interfacial” que oferece alguma resistência à passagem da água. A porosidade e a permeabilidade à água da argamassa diminuem com o decréscimo do rácio água/cimento [30].

Na figura 3.3 apresentam-se as curvas de absorção por capilaridade obtidas em função do tempo de provetes com contacto hidráulico perfeito e com contacto hidráulico real, verificando-se existir uma resistência hídrica na interface deste último.

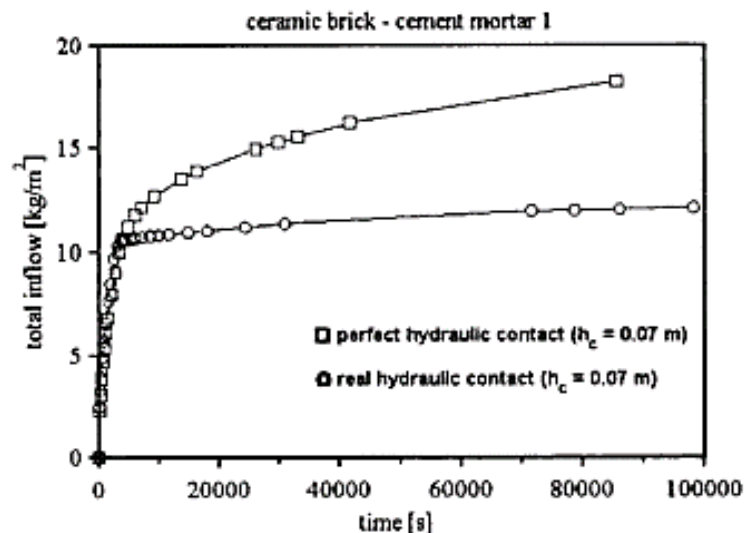


Figura 3.3 – Influência da interface de contacto hidráulico real na absorção de água por capilaridade [30].

Ainda no contexto das diferenças existentes entre os vários tipos de contacto hidráulico, salienta-se o trabalho de Derluyn et al. [31] no qual foram efetuados ensaios com provetes de tijolo e argamassa onde foram consideradas três formas de execução da junta. Este trabalho teve como principal objetivo avaliar a diferença entre as propriedades de transporte de humidade da camada de argamassa em função das condições de cura da mesma. Pretendeu-se ainda simular e explicar o contacto hidráulico imperfeito na interface tijolo/argamassa.

No referido trabalho foram ensaiados três tipos de provetes de tijolo com interface de argamassa. De modo a melhor aproximar a uma interface de contacto hidráulico perfeito, os autores prepararam provetes com uma camada de argamassa curada em molde que foi posteriormente colocada no meio do provete e colmatada com uma fina camada de caulino entre os tijolos e a argamassa, garantindo um contacto hidráulico perfeito (ou próximo). Foram ainda preparados provetes que procuraram representar as condições reais de cura da argamassa em alvenaria. Para tal, executaram-se provetes onde a argamassa fresca foi colocada entre tijolos previamente imersos em água, bem como entre tijolos secos em estufa [31]. Os três tipos de provetes definidos encontram-se representados na figura 3.4.

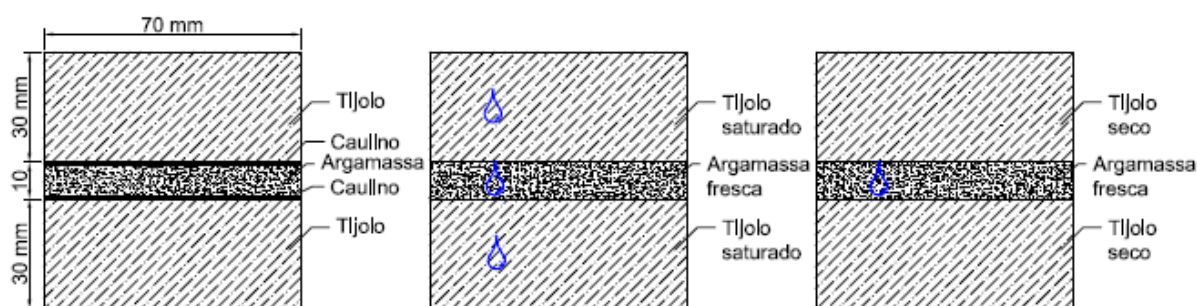


Figura 3.4 – Provetes de contacto hidráulico com diferentes condições de cura da argamassa.

Os resultados obtidos permitiram verificar que o contacto hidráulico, na interface dos provetes com argamassa colocada fresca e curada em contacto com o tijolo é imperfeito. A quantidade de água absorvida nestes provetes foi menor em comparação com os provetes de contacto hidráulico perfeito, corroborando a hipótese de existir uma resistência ao transporte de água associada à cura *in loco* da argamassa. Verifica-se também que esta resistência foi superior nos provetes com tijolos secos em estufa. Por este motivo, conclui-se que estes resultados se devem à perda de água da argamassa fresca para os tijolos resultando numa diminuição do rácio água/cimento e da porosidade acessível à água [31].

Na figura 3.5 apresenta-se a curva de absorção por capilaridade em função da raiz do tempo desde o início do ensaio. Consegue-se visualizar uma alteração no fluxo de humidade nos provetes curados a seco quando comparados com os de contacto hidráulico perfeito e até mesmo com os curados “a húmido”, sendo esta uma situação intermédia. A figura 3.6 representa os mesmos valores obtidos neste ensaio mas apenas a partir do momento em que a água atinge a interface tijolo/argamassa. Mais à frente será referida a importância desta informação na estimativa do fluxo máximo de água transmitido na interface.



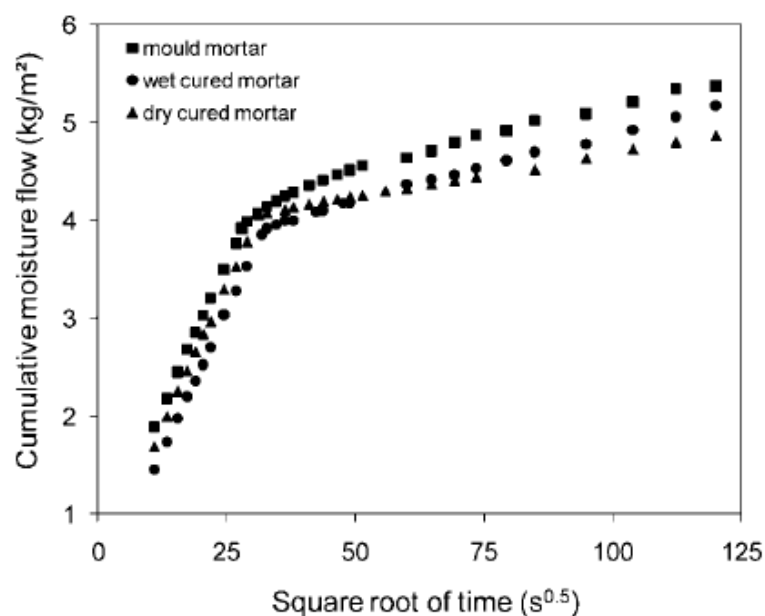


Figura 3.5 – Curvas de absorção de água por capilaridade em provetes de contacto hidráulico com diferentes condições de cura [31].

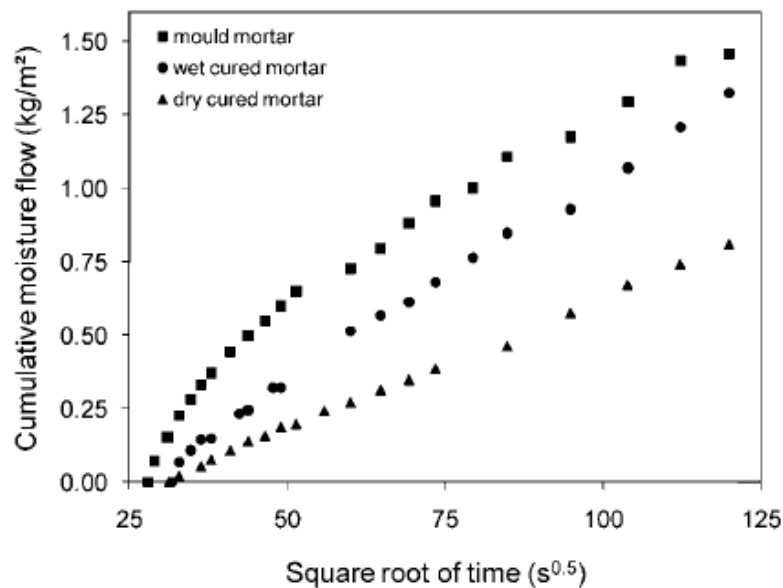


Figura 3.6 – Curvas de absorção de água por capilaridade na interface de provetes de contacto hidráulico com diferentes condições de cura [31].

A figura 3.7 ilustra duas imagens microscópicas da interface entre tijolo e argamassa curada a húmido e a seco.

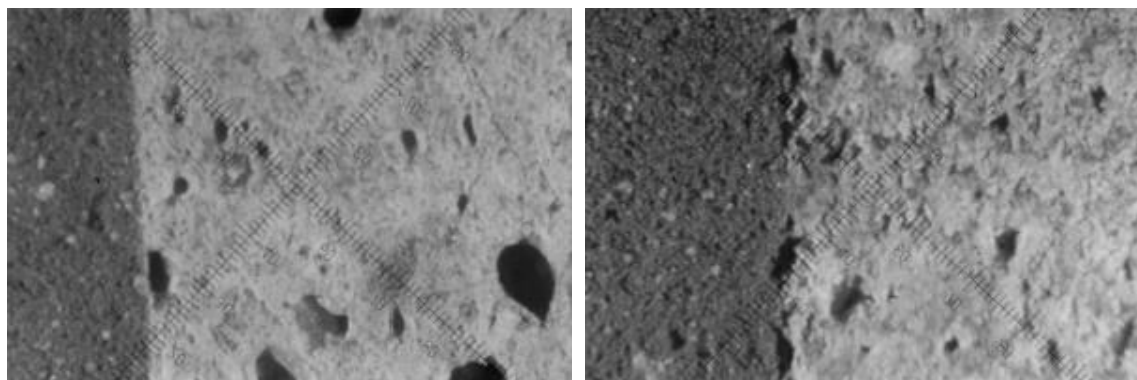


Figura 3.7 – Imagem microscópica dos provetes de argamassa curados a húmido (esquerda) e a seco (direita) [31].

### 3.2.2. CONTACTO PERFEITO

Supondo que existem dois blocos de um determinado material em que um está naturalmente fraturado e o outro é cortado, colocando-se as suas metades de modo a formarem um único bloco e ao serem ensaiados, verificam-se comportamentos distintos. Por um lado o bloco fraturado comportar-se-á praticamente como se fosse um único bloco (monolítico), por outro lado o bloco cortado apresentará uma resistência hídrica considerável na interface. Esta diferença deve-se ao facto da continuidade da estrutura porosa na interface do bloco fraturado ser quase perfeita, o que não se verifica no provete cortado [31]. A figura 3.8 ilustra os dois tipos de contacto referidos. O corte do tijolo com rebarbadora implica a perda de uma camada de alguns milímetros de material. Apesar das duas partes encaixarem perfeitamente, as estruturas porosas das superfícies resultantes do corte não coincidem na sua totalidade, havendo uma descontinuidade da estrutura porosa, o que condiciona a transferência de humidade. Na construção é este o tipo de ligação que se verifica quando temos dois materiais justapostos. Por este motivo, neste trabalho a definição de contacto perfeito estará associada a esta configuração onde os materiais estão em contacto físico perfeito mas não se verifica a continuidade da sua estrutura porosa.

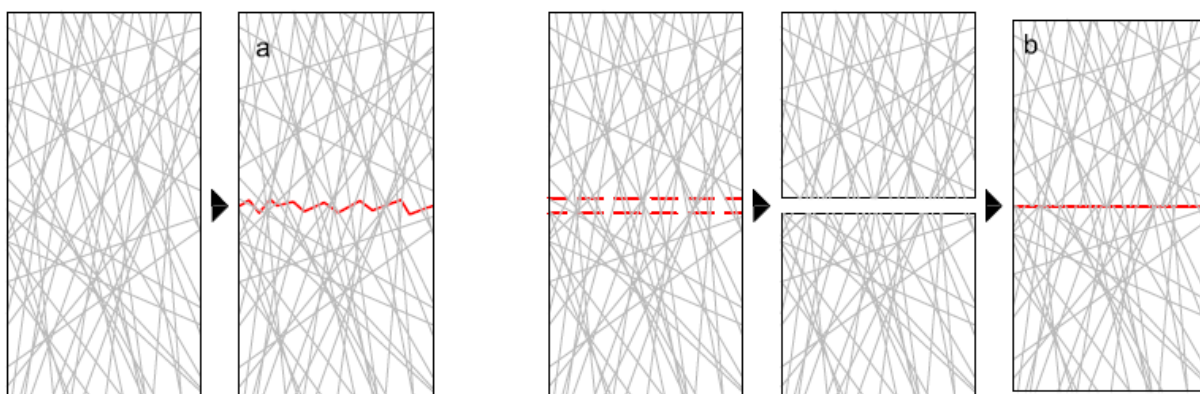


Figura 3.8 – Representação de provetes fraturados (a) e cortados (b).

Como consequência da descontinuidade da estrutura porosa nos materiais em contacto perfeito, a interface provoca uma resistência hídrica que limita os fluxos transmitidos na mesma. Assim, define-se a resistência hídrica pela maior ou menor facilidade de transferência de humidade, a qual é traduzida pelo fluxo máximo transmitido (FLUMAX), expresso em  $\text{kg/m}^2.\text{s}$ , terá de ser calculado por via experimental através da curva de absorção de água por capilaridade em função do tempo, correspondendo à pendente da curva após atingida a descontinuidade, ou seja, a interface [29].

Apesar de existir uma descontinuidade na estrutura porosa, pode dizer-se que o fluxo de humidade que sai da camada inferior é igual ao que entra na camada superior. No entanto a mesma igualdade já não se verifica em relação à pressão capilar [29].

$$p_{c,cp1}(w_1) \neq p_{c,cp2}(w_2) \quad (3.3)$$

$$q_{cp1} = q_{cp2} \quad (3.4)$$

Nas figuras 3.9 e 3.10 podem-se observar as dimensões dos provetes de tijolo com interface de contacto perfeito ensaiados por V. Freitas [29] e as curvas obtidas em ensaios de absorção de água por capilaridade nos mesmos provetes, respetivamente. O autor realizou ensaios com altura da interface variável, tendo considerado as alturas de 20 mm, 50 mm e 70 mm.

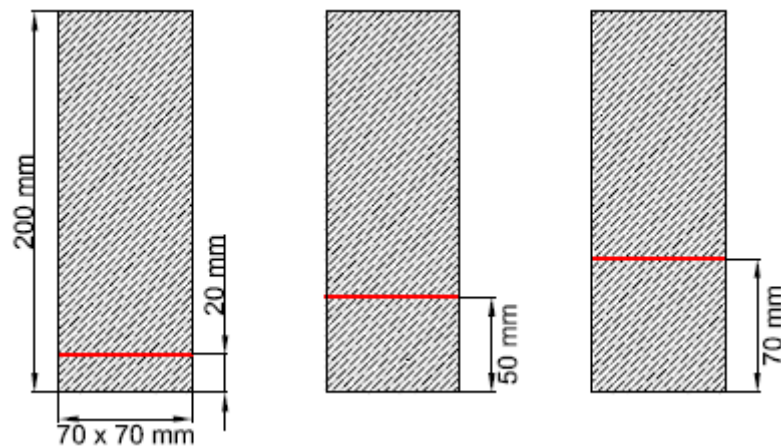


Figura 3.9 – Provetes de tijolo com interface de contacto perfeito com altura variável ensaiados por V. Freitas [29].

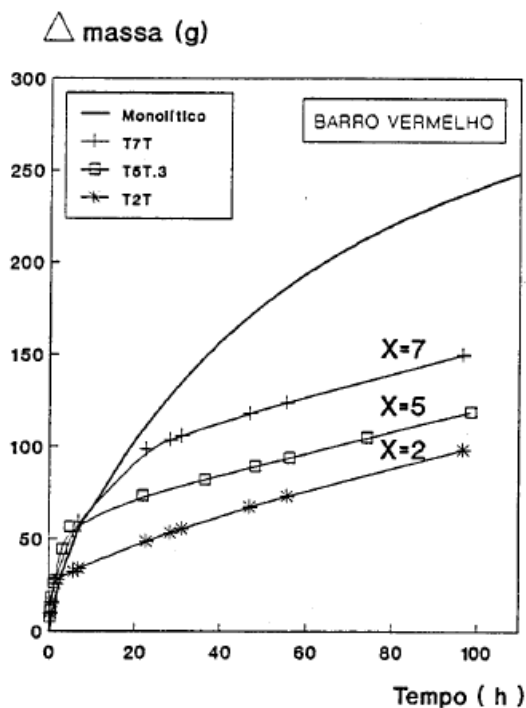


Figura 3.10 - Influência da interface de contacto perfeito a altura variável [29].

V. Freitas [29] registou valores de fluxo máximo transmitido muito próximos entre provetes de tijolo com a altura da interface variável (figura 3.10). Constatou-se, no entanto, uma variação do fluxo máximo transmitido em função da altura da interface em provetes de betão celular. Contudo, este comportamento pode ser explicado pelo facto do fluxo que atinge a interface nos provetes com a interface mais alta já ser inferior ao fluxo máximo transmitido na interface deste tipo de provete. Também foi registado um FLUMAX em provetes com camadas de diferentes materiais diferente dos restantes. Na tabela 3.1 encontram-se representados os valores de FLUMAX obtidos por V. Freitas [29] em ensaios com provetes com interface do tipo contacto perfeito para diferentes materiais.

Tabela 3.1 – Fluxo máximo transmitido em configurações de contacto perfeito, adaptado de [29].

Contacto perfeito	FLUMAX (kg/(m <sup>2</sup> .s))	Número de provetes ensaiados
Tijolo/tijolo	$44 \times 10^{-6}$	5
Betão celular/betão celular	$15 / 30 \times 10^{-6}$	4 / 2
Betão celular/tijolo	$23 \times 10^{-6}$	2

### 3.2.3. ESPAÇO DE AR

Esta configuração caracteriza-se pela existência de um espaço de ar de alguns milímetros a separar as duas camadas. Relativamente ao transporte de humidade, o espaço de ar traduz-se num corte hídrico que impede a transferência de humidade em fase líquida, passando todo o transporte de água a fazer-se em fase de vapor [29].

Em relação às condições de continuidade pode dizer-se que, em regime isotérmico e caso as faces laterais do elemento na zona da interface se encontrem impermeabilizadas, o fluxo de humidade que sai na camada inferior é igual ao fluxo de humidade que entra na camada superior, limitado pelo fluxo máximo de vapor transmitido pelo espaço de ar. O fluxo máximo de vapor transmitido pelo espaço de ar é dependente da espessura desse espaço de ar e da pressão de vapor nas duas superfícies [29].

Considera-se também que existe continuidade da humidade relativa ( $HR_1=HR_2$ ) caso o teor de humidade crítico ( $w_{cr}$ ) seja superior ao teor de humidade da camada com maior humidade. Por sua vez se o teor de humidade de uma das camadas é superior ao  $w_{cr}$ , a camada com menor teor de humidade tende para o  $w_{cr}$  desse material. Importa referir que o teor de humidade crítico ( $w_{cr}$ ) representa o teor de humidade de um material quando em contacto com uma ambiência saturada e abaixo do qual o transporte de água por capilaridade é praticamente impossível [29].

Havendo igualdade da humidade relativa é possível estabelecer uma relação de teor de humidade entre ambos os materiais na interface ( $w_1=S \times w_2$ ), através da relação de  $S(\phi)$  (figura 3.11) [29].

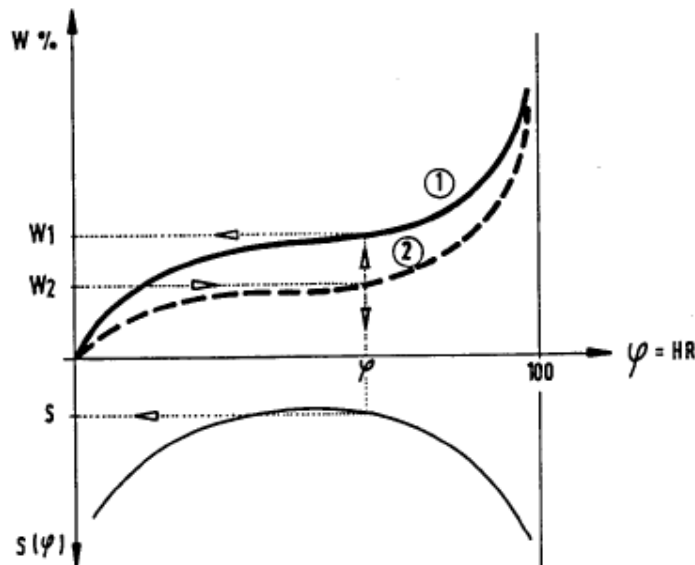


Figura 3.11 – Princípio de cálculo da relação  $S(\phi)$  [29]

Tal como referido anteriormente existe aqui também uma resistência hídrica, ainda que mais acentuada, que limita o fluxo de humidade máximo transmitido. A figura 3.12 apresenta os resultados obtidos por V. Freitas [29] onde se verifica que quando a frente húmida atinge a interface nos provetes com espaço de ar, se observa um aumento constante de peso independente dos materiais que compõem os provetes. Neste trabalho o valor médio obtido para o FLUMAX foi de  $4 \times 10^{-6}$  [29].

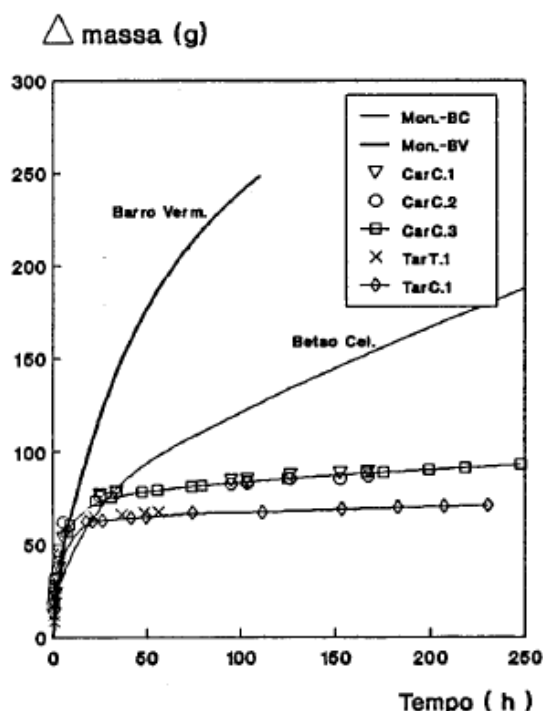


Figura 3.12 - Influência da interface de espaço de ar em diferentes materiais [29].

### 3.3. INFLUÊNCIA DA INTERFACE EM PROCESSOS DE EMBEBIÇÃO – RESULTADOS EXPECTÁVEIS

Com base no exposto considera-se interessante procurar prever o comportamento de provetes a ensaiar no trabalho com as diferentes interfaces apresentadas durante ensaios de absorção de água por capilaridade.

#### 3.3.1. INTERFACE DE CONTACTO HIDRÁULICO

Neste caso os provetes a ensaiar serão constituídos por três camadas, duas delas compostas pelo mesmo material. O provete será constituído por blocos cúbicos de tijolo com 5 cm de lado que se encontram separados por uma camada intermédia de argamassa com 7 mm de espessura. Desta forma, durante o ensaio de absorção por capilaridade a água terá de atravessar duas descontinuidades provocadas pela junta (tijolo/argamassa e argamassa/tijolo) para atingir a superfície superior do provete. Pelo facto dos dois materiais terem características porosas diferentes, a água assumirá um comportamento distinto quando os atravessa. A água irá penetrar com maior facilidade num dos materiais, sendo este aquele que apresenta um coeficiente de capilaridade superior. Desta forma, espera-se que as perturbações na curva de absorção se verifiquem no momento em que a frente húmida atinge a descontinuidade provocada pela interface.

No entanto, coloca-se uma questão relativa à maior ou menor facilidade da água atravessar os provetes. No trabalho de M. Cunha [32] foi abordada experimentalmente a influência deste tipo de interfaces através de ensaios de capilaridade semelhantes aos que serão aqui efetuados. Contudo, nos referidos ensaios a frente húmida não atravessou completamente a camada de argamassa. Importa referir que os provetes ensaiados pela autora tinham uma altura muito superior, sendo que a distância mínima da base

à interface de argamassa ensaiada corresponde a 11 cm, valor elevado em comparação com os 5 cm aqui utilizados. Outro fator que pode justificar esses resultados é o do rácio água/cimento utilizado ser muito reduzido. Desta forma, esperam-se três possíveis cenários para este ensaio:

- Cenário 1 - A frente húmida não atravessa completamente a camada de argamassa, este foi o caso observado no trabalho de M.Cunha [32]. A figura 3.13 simula o comportamento esperado de um provete onde a camada de argamassa apresenta um coeficiente de capilaridade inferior ao do tijolo (proвете PC) e no qual a frente húmida não consegue atravessar esta camada. Acima da reta a tracejado “1a” toda a água será absorvida pela interface de argamassa.

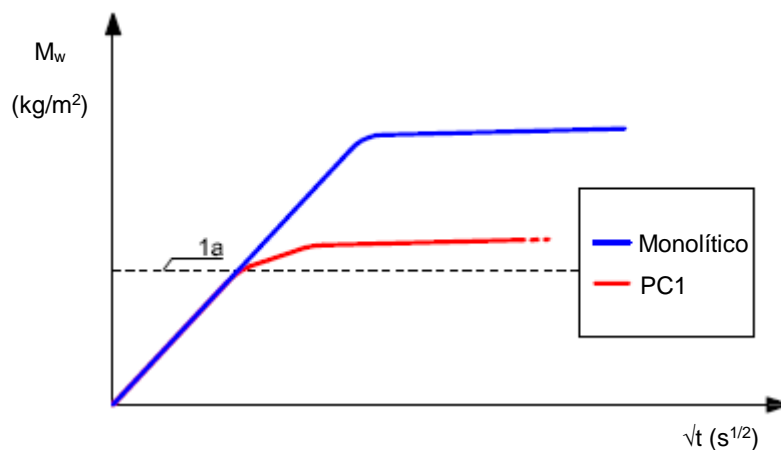


Figura 3.13 – Curva de absorção de água por capilaridade estimada em provetes com interface de contacto hidráulico em que a frente húmida não atravessa a interface.

- Cenário 2: A frente húmida não só atravessa completamente a camada de argamassa como se verifica a embebição completa do provete. Considerando que os provetes têm uma altura apenas de 11,7 cm e que estão impermeabilizados nas faces laterais impossibilitando a secagem pelas mesmas, este é o cenário mais provável. A figura 3.14 apresenta as curvas de absorção de água por capilaridade de provetes com camada intermédia de argamassa. O provete PC1 contém uma camada de argamassa com coeficiente de capilaridade maior do que o tijolo, por outro lado o PC2 apresenta um coeficiente de capilaridade menor do que o tijolo. Entre a reta a tracejado “1a” e a reta a tracejado “2a” toda a água será absorvida pela interface. As retas “3a” e “1b” representam respetivamente, a quantidade de água absorvida em provetes com interface de contacto hidráulico e em provetes monolíticos, quando a frente húmida atinge a superfície superior dos provetes.

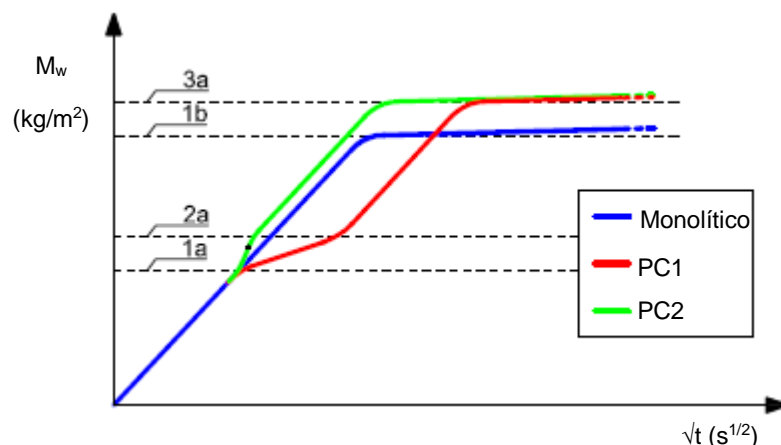


Figura 3.14 - Curva de absorção de água por capilaridade estimada em provetes com interface de contacto hidráulico em que a frente húmida atravessa a interface e o provete fica saturado.

Atingido o patamar 3a, as curvas correspondentes aos provetes PC1 e PC2 não terão necessariamente que coincidir, antes pelo contrário, uma vez que as argamassas têm estruturas porosas diferentes é provável que uma delas absorva mais água, no entanto as curvas foram representadas desta forma por simplificação uma vez que este não é um fator mais relevante.

- Cenário 3: A frente húmida atravessa completamente a camada de argamassa, no entanto não atinge a superfície superior do provete. Esta situação corresponde a uma solução intermédia. A curva seria idêntica à obtida no cenário 2 mas a quantidade total de água absorvida seria menor, atingindo-se o patamar mais abaixo, entre 3a e 2a.

### 3.3.2. INTERFACE DE CONTACTO PERFEITO E DE ESPAÇO DE AR

À semelhança dos provetes com argamassa, os provetes com interface de contacto perfeito e espaço de ar serão compostos por duas camadas de tijolos com 5 cm de espessura. Nos provetes de contacto perfeito as camadas de tijolos encontrar-se-ão justapostas, assegurando o contacto físico perfeito entre as suas superfícies. Os restantes terão um espaço de ar de aproximadamente 3 mm a separar as duas camadas de tijolo.

Nos ensaios realizados com estes provetes um dos principais objetivos será o de calcular os fluxos máximos transmitidos para cada uma das interfaces. Estes valores corresponderão às pendentes das curvas de absorção por capilaridade em função do tempo na zona da descontinuidade. A figura 3.15 apresenta o tipo de curva que se espera obter e a partir da qual se estimará esse fator.



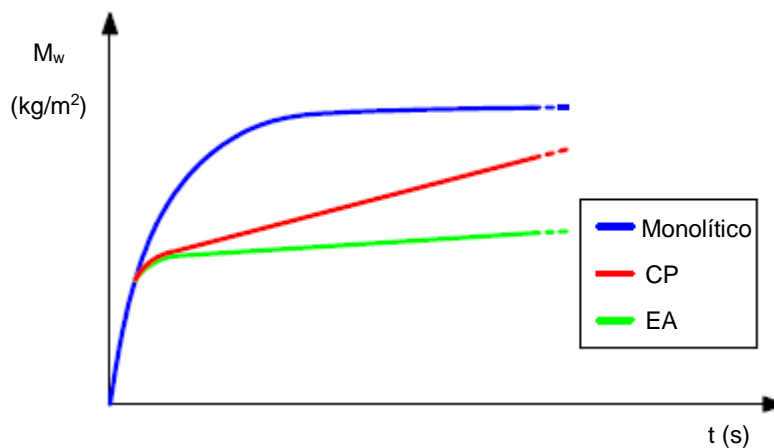


Figura 3.15 - Curva de absorção de água por capilaridade estimada em provetes com interface CP e EA.

Os resultados obtidos deverão ter a mesma ordem de grandeza dos obtidos por V. Freitas [29], representados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores de fluxo máximo transmitido em diferentes interfaces, adaptado de [29].

Configuração de contacto	FLUMAX (kg/m <sup>2</sup> .s)	Número de provetes ensaiados
Contacto perfeito (tijolo/tijolo)	$44 \times 10^{-6}$	5
Espaço de ar (2 a 4 mm) [independente do material]	$4 \times 10^{-6}$	5

O fluxo máximo transmitido também será calculado para a interface de argamassa embora o tipo de resistência oferecida à passagem da água neste tipo de interface seja diferente. Como foi referido, na interface de contacto perfeito e de espaço de ar existe uma descontinuidade física da estrutura porosa, por outro lado nos provetes com contacto hidráulico a resistência está associada a alterações da estrutura porosa da argamassa próxima do tijolo provocada pelas condições de cura da mesma.

### 3.4. INFLUÊNCIA CONJUNTA DE SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS E DA INTERFACE EM PROCESSOS DE EMBEBIÇÃO – RESULTADOS ESPERADOS

Durante a campanha experimental serão também ensaiados o mesmo tipo de provetes referidos no ponto 3.3 imersos nas soluções aquosas salinas selecionadas no capítulo anterior (solução saturada de sulfato de sódio e solução saturada de cloreto de potássio). Apesar de não existir informação relativa a ensaios com estas duas variáveis, pode-se perspetivar uma possível alteração nos processos de embebição em função da combinação de ambas.

### 3.4.1. INFLUÊNCIA NO COEFICIENTE DE CAPILARIDADE

No que diz respeito ao coeficiente de capilaridade, é pouco provável que se venham a verificar diferenças neste valor calculado para provetes com interface de contacto perfeito e de espaço de ar, em relação a provetes monolíticos, ensaiados com a mesma solução. O coeficiente de capilaridade será calculado a partir da quantidade de água absorvida pelo provete antes da frente húmida atingir a interface, pelo que esta não deverá ter influência neste parâmetro.

No entanto, apesar pouco provável, no caso dos provetes com interface de contacto hidráulico (pasta de contacto), existe a possibilidade da camada intermédia de argamassa interferir no coeficiente de capilaridade da camada subjacente de tijolo. Considerando que os provetes serão impermeabilizados nas faces laterais, à medida que a água vai penetrando os provetes o ar presente nos poros será expulso unicamente através da superfície superior dos provetes, tendo para isso que atravessar a camada de argamassa. Caso a camada de argamassa ofereça uma resistência à passagem do ar bastante superior à que o tijolo oferece, supõem-se que possa existir um atraso na embebição que se reflita no coeficiente de capilaridade. Assim, caso se verifiquem diferenças no coeficiente de capilaridade calculado para esta combinação, estas deverão ser apenas no sentido do decréscimo do seu valor face ao obtido nos ensaios com provetes monolíticos.

### 3.4.2. INFLUÊNCIA NO FLUXO MÁXIMO TRANSMITIDO

Como foi referido no capítulo 2, as soluções aquosas salinas deverão ter influência no valor do coeficiente de capilaridade a determinar, sendo que esta ideia pode ser suportada por trabalhos como o de J. Azevedo [21] que observou experimentalmente essa influência. Presume-se também que a presença dos sais solúveis se reflita na cinética de embebição dos provetes após ser atingida a interface, para provetes com interface de contacto perfeito e de contacto hidráulico. Contudo, uma vez que os estudos existentes relativos à influência da interface nos processos de embebição não consideram a presença de sais dissolvidos, esta conjectura não tem suporte científico, sendo, por isso, discutível até à análise dos resultados que serão obtidos na campanha experimental do presente trabalho.

A figura 3.16 apresenta um esboço das hipotéticas curvas de absorção por capilaridade em função do tempo. Estas curvas são representativas tanto para provetes com interface de contacto hidráulico como de contacto perfeito (em termos qualitativos).

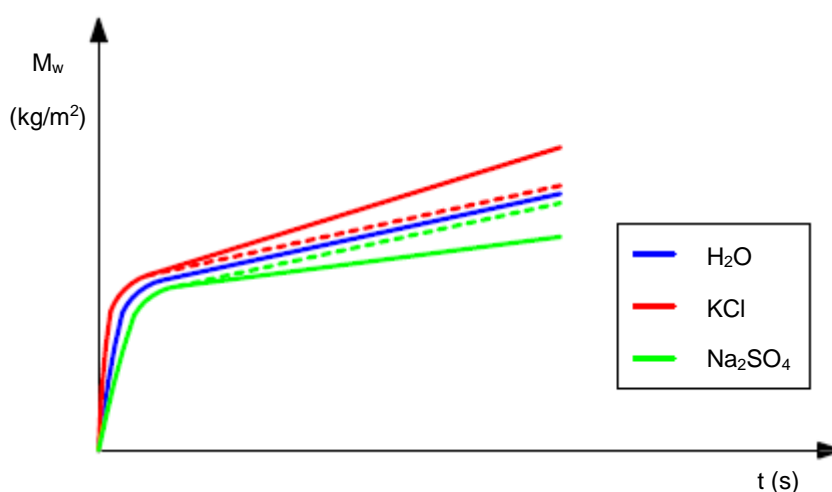


Figura 3.16 – Curvas de absorção por capilaridade em função do tempo, para provetes CP ou PC, imersos em diferentes soluções.

As curvas com linha contínua representam as hipóteses mais prováveis, em que os sais influenciam a cinética de embebição depois de ser atingida a interface, refletindo-se numa variação do FLUMAX (declive do troço reto). As curvas a tracejado correspondem à hipótese em que o fluxo máximo transmitido na interface se mantém constante, não sendo influenciado pelos sais. Neste último caso a influência dos sais só se verificaria na fase inicial de embebição, até ser atingida a interface, sendo semelhante ao observado em provetes monolíticos.

Relativamente aos provetes com espaço de ar, também se espera que haja variações no FLUMAX resultantes da presença de sais. Como já foi mencionado, a transferência de humidade neste tipo de provetes processar-se-á na fase de vapor, uma vez que não existe continuidade da rede porosa na interface. Assim, a transferência de humidade deverá estar relacionada com a pressão de vapor da solução utilizada. Uma vez que a pressão de vapor de soluções aquosas salinas é inferior à da água, o FLUMAX deverá ser inferior nos ensaios realizados com provetes de espaço de ar imersos em qualquer uma das soluções aquosas face à água. O facto das soluções aquosas salinas terem uma pressão de vapor mais baixa do que a água pura pode ser explicada pela lei de Raoult, segundo a qual a pressão de vapor de uma solução depende da pressão de vapor de cada um dos seus elementos. Uma vez que os sais são substâncias não voláteis, quando dissolvido na água, a pressão de vapor da solução resultante diminui [33]. A figura 3.17 apresenta as curvas espectáveis nos ensaios com provetes com espaço de ar imersos nas diferentes soluções.

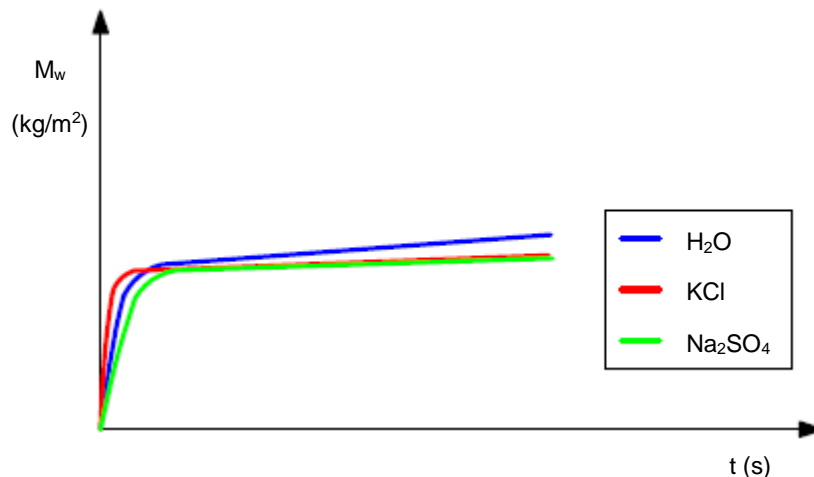


Figura 3.17 – Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, de provetes com espaço de ar imersos em diferentes soluções.

### 3.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Os elementos construtivos são, usualmente, constituídos por várias camadas de materiais com diferentes características porosas. Desta forma, é necessário o conhecimento das condições de continuidade entre camadas para o estudo da transferência de humidade nos edifícios. Contudo, esta é uma matéria que não tem sido muito aprofundada pela comunidade científica, principalmente no que diz respeito à sua combinação com a ação dos sais solúveis, tema abordado no anterior capítulo. Por este motivo, foi

proposta a execução deste trabalho, procurando-se avançar na compreensão da influência conjunta da ação dos sais e dos diferentes tipos de interface na cinética de embebição de materiais porosos.

Na construção, consideram-se três configurações de contacto, sendo estas o contacto hidráulico, o contacto perfeito e o espaço de ar entre camadas.

O contacto hidráulico caracteriza-se pela existência de uma interpenetração da rede porosa das duas camadas. Este é o tipo de interface comum em paredes de alvenaria, na ligação entre as unidades básicas e a argamassa. Na realidade quando se coloca a argamassa fresca entre camadas de um material poroso seco, parte da água presente na argamassa é absorvida por este material, alterando as características porosas da argamassa na proximidade da interface que se traduz numa maior resistência à penetração da água nesta zona.

O contacto perfeito compreende duas camadas justapostas, verificando-se o contacto físico perfeito entre as suas superfícies mas sem a interpenetração da rede porosa, existindo uma descontinuidade da mesma. Consequentemente verifica-se uma resistência hídrica que perturba o fluxo de humidade transmitida na interface. Contudo, neste tipo de interface a água ainda consegue penetrar a camada superior na fase líquida.

O espaço de ar entre camadas, por sua vez, impõe um corte hídrico que impede a transferência de humidade na fase líquida, processando-se esta apenas na fase de vapor.

Na campanha experimental levada a cabo neste trabalho serão avaliados os fluxos máximos transmitidos em cada interface e para diferentes soluções salinas. Espera-se que, em provetes com interface, exista alguma resistência à transferência de humidade, ainda que maximizada nos provetes com espaço de ar uma vez que a transferência de humidade na interface se processa apenas na fase de vapor. As soluções salinas utilizadas poderão também ter influência no fluxo máximo de humidade transmitida, aumentando ou diminuindo este valor consoante o tipo de interface e de sal.

# 4

## **ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DE SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS NA ABSORÇÃO DE PAREDES COM MÚLTIPLAS CAMADAS**

### **4.1. INTRODUÇÃO**

O trabalho laboratorial desenvolvido teve como principal objetivo avaliar o efeito de duas soluções aquosas salinas no processo de embebição de provetes de tijolo cerâmico com diferentes soluções de interface através de ensaios de absorção unidirecional por capilaridade.

Os ensaios foram realizados com provetes de tijolo maciço impermeabilizados nas faces laterais, de modo a garantir a transferência unidirecional da humidade. Desta forma a absorção de água deu-se apenas pela base dos provetes e a evaporação pela face superior.

Será esperado que diferentes sais e soluções de interface influenciem de forma distinta a absorção de fluido durante os ensaios. Apesar da informação existente sobre sais ser relativamente extensa e de existirem vários trabalhos relacionados com a influência da interface nos mecanismos de transporte de humidade, a combinação destas duas variáveis tem sido pouco estudada, o que justifica a importância dos resultados destes ensaios, bem como a difícil previsão dos mesmos.

Optou-se por realizar ensaios referenciais, utilizando parâmetros bastante estudados. Em relação ao fluido a utilizar no ensaio, como base de comparação optou-se pela água destilada, servindo os valores obtidos como referência para os valores registados nos ensaios realizados com soluções aquosas salinas. Pelas razões abordadas no capítulo 2, optou-se por utilizar soluções aquosas salinas saturadas de cloreto de potássio e de sulfato de sódio.

Como referência utilizaram-se provetes monolíticos (sem interface) com dimensões de 5 cm × 5 cm × 10 cm. Para além destes, foram utilizados provetes com os três tipos de interface descritos no capítulo 3: contacto perfeito, pasta de contacto (contacto hidráulico) e espaço de ar. Na figura 4.1 apresenta-se um esquema do modelo de provetes idealizados.

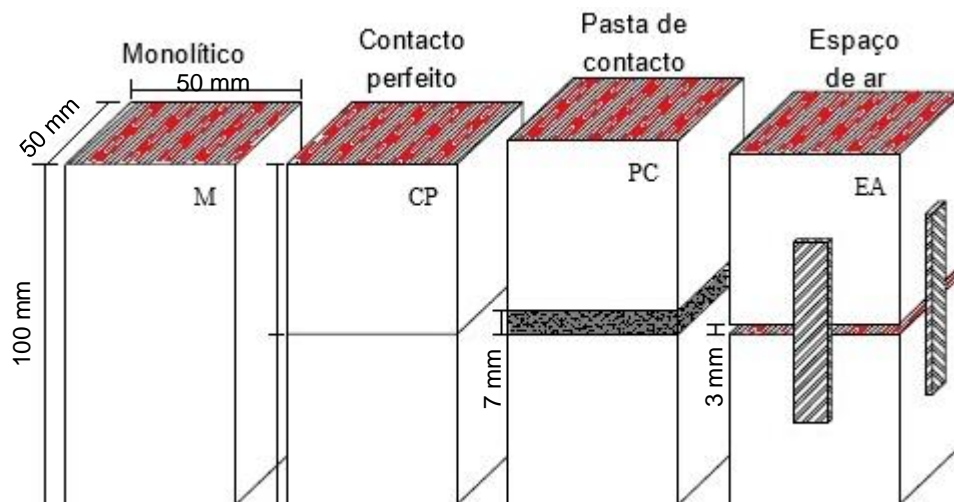


Figura 4.1 –Provetes ensaiados.

Considerando as quatro soluções de provetes referidas do ponto de vista da interface, e os três fluidos utilizados, foram ensaiadas doze combinações diferentes (figura 4.2), sendo que para cada combinação se efetuaram três ensaios, perfazendo um total de trinta e seis ensaios de absorção por capilaridade.

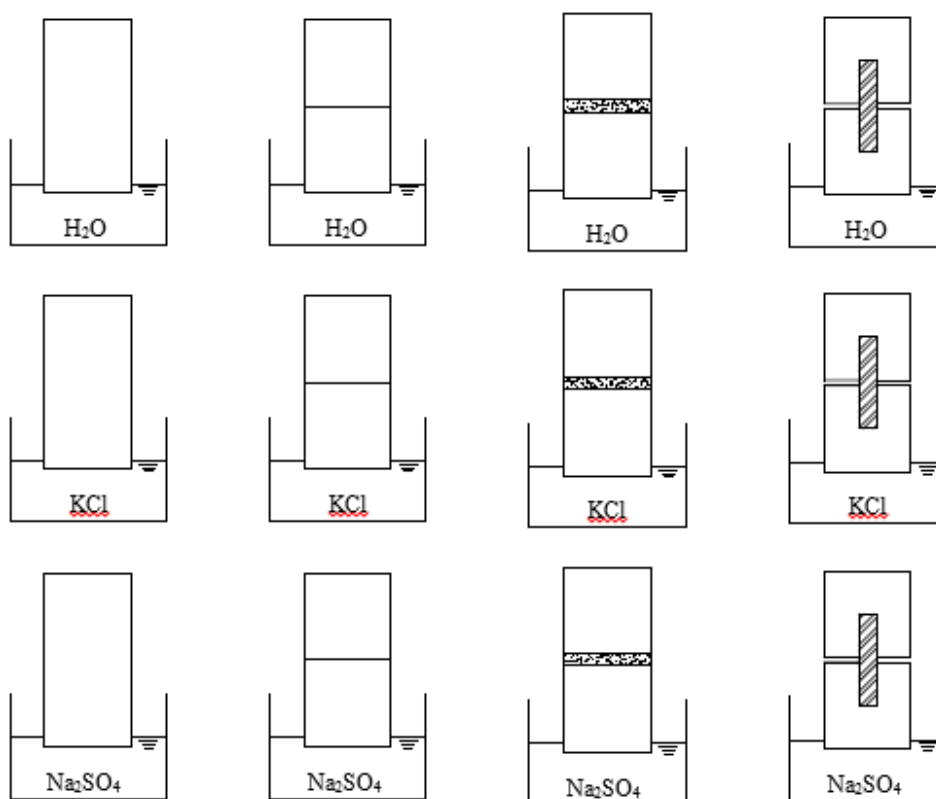


Figura 4.2 – Combinações de provetes/fluidos ensaiados.

## **4.2. PREPARAÇÃO DOS PROVETES**

### **4.2.1. CORTE DOS TIJOLOS**

Os tijolos com dimensões iniciais de 23 cm × 11 cm × 7 cm foram cortados em peças mais pequenas de 5 cm × 5 cm × 10 cm (provetes monolíticos) e 5 cm × 5 cm × 5 cm (provetes com interface). No total foram necessários nove tijolos com dimensões de 5 cm × 5 cm × 10 cm e cinquenta e quatro tijolos de 5 cm × 5 cm × 5 cm. No entanto cortaram-se mais do que o número necessário de peças para se poder rejeitar os tijolos mais irregulares e os que estivessem danificados/fissurados. Após o corte dos tijolos, estes foram armazenados no Laboratório de Física das Construções (LFC) da FEUP durante a pesquisa bibliográfica e o início do desenvolvimento do estado da arte. Importa referir que não foi possível cortar os tijolos a seco e que a rebarbadora disponível era alimentada por água de poço. A utilização da água de poço não era a solução ideal, no entanto não foi possível efetuar uma ligação a um reservatório de água destilada. Desta forma, é possível que, após a secagem dos tijolos, tenha ficado retida uma reduzida quantidade de sais na rede porosa dos tijolos. Contudo, os sais que possam ter sido absorvidos terão valores pouco relevantes em comparação com a quantidade de sal presente nas soluções aquosas salinas saturadas utilizadas nos ensaios, o que se considera aceitável. As figuras 4.3 e 4.4 ilustram o corte e a forma final das peças obtidas.



Figura 4.3 – Corte dos tijolos com rebarbadora.



Figura 4.4 - Peças de tijolo cortadas com as dimensões finais.



#### 4.2.2. IMPERMEABILIZAÇÃO DAS FACES LATERAIS

Após repouso de cerca de três semanas, iniciou-se a impermeabilização dos tijolos. O objetivo seria impermeabilizar as faces laterais do material de modo a que o transporte de humidade ocorresse unidireccionalmente. Para a impermeabilização utilizou-se a resina epóxi da Sika Icosit k-101 N (figura 4.5). Esta resina é composta por dois componentes (A e B) e a utilização correta da resina pressupõe a mistura dos mesmos com um rácio de 79 partes de A para 21 partes de B (figura 4.6). Nesta fase surgiu uma dificuldade relativamente à qualidade do material, uma vez que este já tinha sido utilizado e estava armazenado há cerca de um ano. Por este motivo, o componente A secou parcialmente formando uma crosta de alguns centímetros à superfície. No entanto, por baixo da crosta foi possível encontrar o componente no estado líquido e após a mistura e a avaliação do composto resultante, pensa-se que estaria em condições de ser utilizado, garantindo a impermeabilização conveniente das faces laterais.



Figura 4.5 - Resina epóxi Sika Icosit k-101 N (componentes A e B).



Figura 4.6 a) e b) – Adição do componente B ao A com auxílio de balança e posterior mistura.



Homogeneizado o composto, este foi cuidadosamente aplicado com recurso a pincéis em duas fases. Inicialmente, para cada tijolo impermeabilizaram-se duas faces laterais paralelas e só após a secagem destas se procedeu à impermeabilização das restantes (figura 4.7). A impermeabilização dos provetes demorou alguns dias devido ao elevado número de peças a impermeabilizar e ao cuidado que esta tarefa exige para garantir que as faces destinadas à absorção e evaporação não fossem acidentalmente impermeabilizadas.



Figura 4.7 - Impermeabilização dos provetes.

#### 4.2.3. MATERIALIZAÇÃO DA INTERFACE

Os provetes de contacto hidráulico foram executados com uma camada intermédia de argamassa, pelo que foram os últimos a ser impermeabilizados. A argamassa utilizada foi a Sika MonoTop 620 com um rácio água/cimento de 1:4,4. Definiu-se uma espessura de argamassa de 7 mm e foram utilizados grampos na fixação das cofragens para garantir a correta aplicação da argamassa, evitando assentamentos do tijolo superior. Após a cura da argamassa, que durou cerca de duas semanas, procedeu-se à impermeabilização destes provetes da mesma forma que os restantes. A figura 4.8 ilustra a aplicação da argamassa com auxílio de grampos e cofragens.

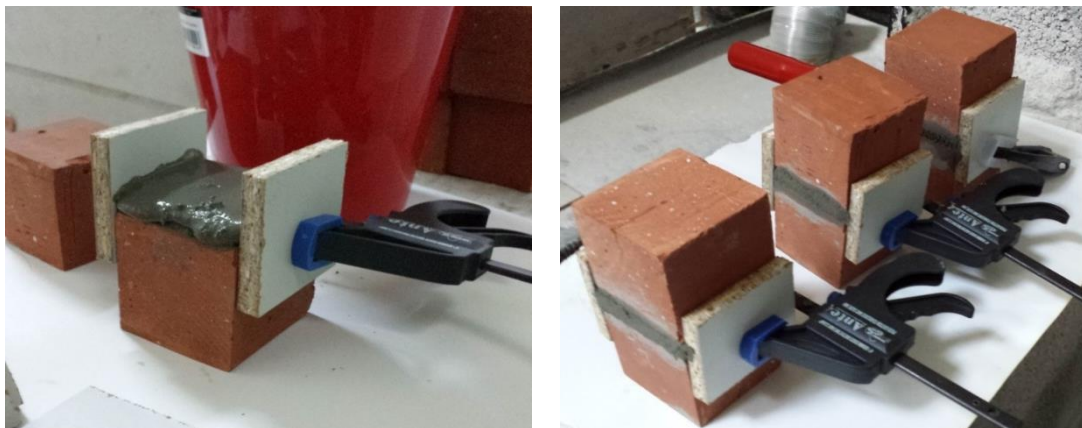


Figura 4.8 a) e b) - Colocação da argamassa com auxílio de grampos e cofragens.

Na sequência da secagem da resina epóxi dos provetes de contacto perfeito e de espaço de ar, estes tiveram que ser preparados para os ensaios. Os provetes de contacto perfeito foram rigidamente ligados por uma fita-cola de alumínio para evitar movimentos relativos entre os dois cubos de tijolo que formam o provete (figura 4.9).

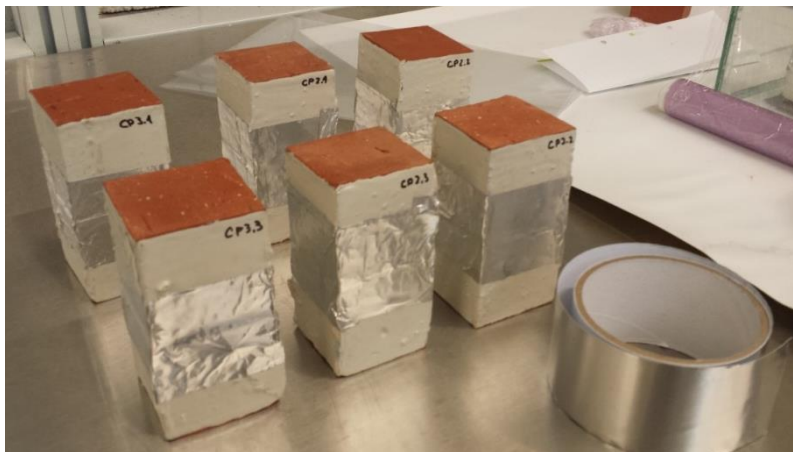


Figura 4.9 - Ligação dos provetes de CP com fita-cola de alumínio.

Para os provetes com espaço de ar, definiu-se um espaçamento entre os tijolos de 3 mm. Para garantir este espaçamento colocaram-se placas de PVC com a espessura pretendida entre as duas camadas de tijolo durante a colagem das ligações. As ligações foram materializadas por pequenas plaquetas de alumínio coladas às faces laterais dos provetes com a cola Sikaflex Crystal (figura 4.10). A escolha do material utilizado quer nas ligações dos provetes com espaço de ar, quer na fita-cola dos provetes com interface de contacto perfeito recaiu sobre o alumínio por se tratar de um material metálico, não higroscópico. Assim evitam-se possíveis interferências que poderiam ocorrer devido à adsorção de humidade em materiais higroscópicos, como o aumento de peso dos provetes.

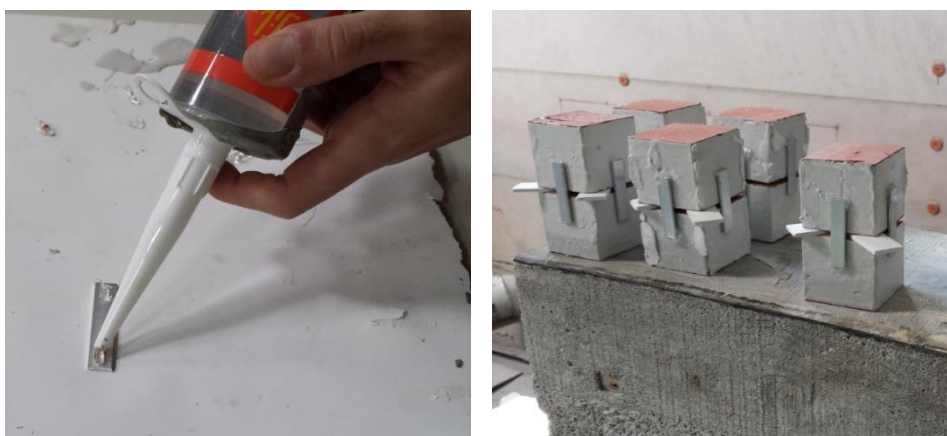


Figura 4.10 a) e b) - Ligação dos provetes espaço de ar com placas de alumínio.

#### 4.2.4. SECAGEM EM ESTUFA

Após a preparação dos provetes, o passo que se seguiu foi a secagem dos mesmos em estufa a uma temperatura de 60 °C até a estabilização da sua massa (figura 4.11). O tempo total de secagem em estufa foi de 126 horas. Com este processo pretendia-se calcular a massa seca dos provetes e evitar diferenças no teor de água dos diferentes provetes no início dos ensaios. Retirados os provetes da estufa, estes ficaram armazenados durante cerca de duas semanas na sala do LFC onde se processaram os ensaios, atingindo assim o equilíbrio higroscópico com a ambiência.



Figura 4.11 - Secagem dos provetes na estufa.

#### 4.2.5. RESERVATÓRIOS E APOIOS

Os reservatórios utilizados nos ensaios foram montados a partir de peças de vidro cortadas à medida de forma a que estes tivessem as dimensões adequadas aos ensaios. Foram produzidos dois reservatórios com dimensões de 40 cm × 25 cm × 13 cm. Cada reservatório permite o ensaio de seis provetes em simultâneo de forma a garantir que a área da base do reservatório é pelo menos duas vezes superior à área total dos seis provetes a ensaiar. Esta condição pretende minimizar as variações do fluido. A altura de 13 cm do reservatório é suficiente para permitir que este seja fechado durante os ensaios sem ser demasiado alto, o que poderia dificultar as manobras durante a pesagem. Para a colagem do reservatório foi utilizada a mesma cola da Sika utilizada na montagem das ligações metálicas dos provetes com espaço de ar. Após a secagem da cola os reservatórios foram devidamente limpos e testados com água, para se verificar a selagem das juntas. A figura 4.12 ilustra o aspeto final de um dos reservatórios.



Figura 4.12 – Reservatório a utilizar nos ensaios.

A solução inicial adotada para os apoios consistiu na utilização de placas de zinco perfuradas com berbequim nas quais foram posteriormente colados pioneses com SikaFlex Crystal. No entanto, após os primeiros ensaios com provetes monolíticos e de contacto perfeito em água verificou-se a degradação das placas de zinco devido a uma possível reação deste material com a água. Na figura 4.13 é possível comparar os apoios de zinco antes e após os primeiros ensaios. Como alternativa optou-se pela utilização de bases de polietileno perfuradas por pioneses, estando os provetes apoiados sobre estes durante os restantes ensaios realizados (figura 4.14).

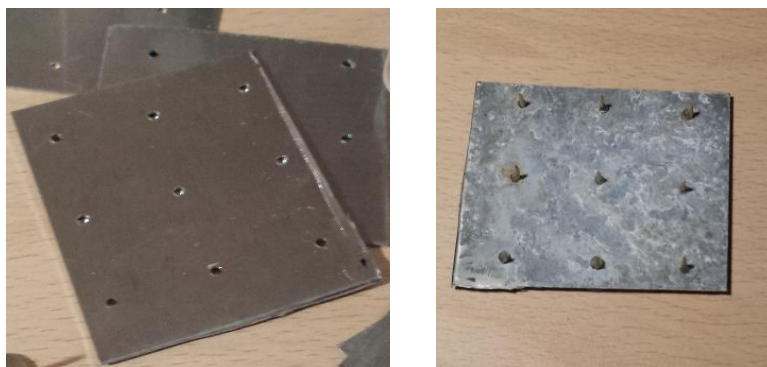


Figura 4.13 – Apoios de zinco antes (esquerda) e após (direita) os ensaios.

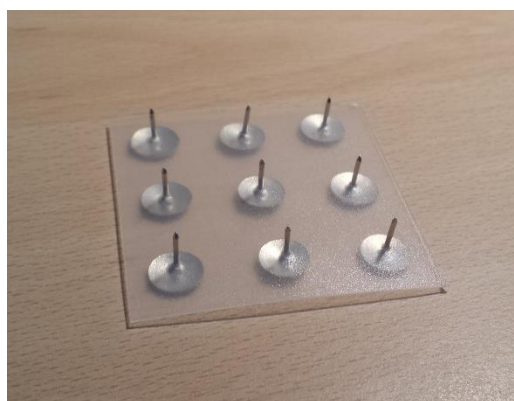


Figura 4.14 – Apoio com base de polietileno.

É de salientar que tanto na execução dos reservatórios como dos apoios se procuraram utilizar materiais insolúveis, que não reagissem com a água nem com as soluções salinas em estudo, de modo a evitar a sua interferência com os resultados dos ensaios. A reação do zinco com água não era expectável uma vez que se utilizou água destilada que tem um pH neutro. No entanto, o facto da água se encontrar em contacto com o ar possibilita a sua reação com o dióxido de carbono, o que origina a formação de ácido carbónico e libertação de iões hidróxido. Estes iões, posteriormente, reagem com o zinco originando a camada esbranquiçada de hidróxido de zinco observada na figura 4.13. Apesar de não se esperar grande influência do hidróxido de zinco nos resultados, optou-se preventivamente por trocar os apoios.

### 4.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA VERTICAL

#### 4.3.1. ANÁLISE E SELEÇÃO DO PROCEDIMENTO A ADOTAR

Para a realização dos ensaios procurou-se estudar várias normas de ensaios de absorção por capilaridade de modo a escolher a mais adequada à campanha experimental proposta, tendo-se destacado essencialmente as seguintes 3 normas/procedimentos:

- ASTM 1403-05 [34]
- ISO 15148:2002 [35]
- Rilem test No. II.6 [36]

O objetivo dos três procedimentos é genericamente idêntico sendo que todos pretendem determinar o coeficiente de absorção por capilaridade através da imersão parcial do material a ensaiar. Qualquer um destes procedimentos poderia ser adaptado ao ensaio a realizar, contudo não se estaria a seguir a norma com rigor.

A norma ASTM 1403-05 é uma norma americana específica para ensaios de capilaridade com provetes de argamassa utilizada em alvenaria. Esta norma pressupõe a utilização de provetes cúbicos de 5 cm de lado e não impermeabilizados nas laterais. Por estas razões considerou-se pouco interessante.

A norma ISO 15148:2002 é a norma europeia mais utilizada para a determinação do coeficiente de capilaridade de materiais de construção em geral. Contudo, a utilização desta norma nos seus exatos pressupostos seria inviável devido ao tempo limitado de execução do presente trabalho. Esta norma exige o ensaio de provetes com uma área mínima de 50 cm<sup>2</sup> e recomendada de 100 cm<sup>2</sup>, ou seja, 2 e 4 vezes superior à que foi utilizada neste trabalho. No caso de se utilizarem provetes com dimensões inferiores a 100 cm<sup>2</sup>, esta norma exigiria a utilização de pelo menos 6 provetes por ensaio (por combinação) o que implicaria o dobro do tempo a ensaiar. A utilização de provetes maiores traria, por sua vez, maior precisão ao resultado ainda que alguma dificuldade na execução de vários ensaios em simultâneo devido à área de superfície de reservatório necessária. Mesmo encontrando uma forma viável de se executar os ensaios pela norma ISO, os resultados obtidos não seriam adequados a uma comparação direta com os resultados obtidos por alguns trabalhos interessantes nesta área., com provetes de menores dimensões.

O procedimento da Rilem test No. II.6 pressupõe a utilização de provetes com base quadrada impermeabilizados nas suas faces laterais, não limitando no entanto as suas dimensões. Considerou-se que este seria o procedimento mais apropriado para este trabalho, uma vez que foi o procedimento utilizado por autores de trabalhos relacionados, o que permite uma comparação direta com os resultados a obter. Foi o procedimento utilizado na realização de vários ensaios semelhantes, nomeadamente J. Azevedo [21] e M. Cunha [32], nas suas dissertações de mestrado que estiveram na base deste trabalho.

#### 4.3.2 TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA

A influência da temperatura na pressão capilar em solos constatada empiricamente ao longo dos tempos foi alvo de estudo por Philip e de Vries [37]. Através dos estudos efetuados verifica-se que a pressão capilar diminui linearmente com a temperatura, subsistindo várias teorias que procuram explicar este fenómeno. Em relação aos materiais utilizados na construção existem estudos que afirmam verificar-se a tendência de alguns materiais em apresentar oscilações nos seus coeficientes de absorção capilar em função da temperatura. Mukhopadhyaya, *et al.* [38] verificaram experimentalmente essa variação em provetes de tijolo maciço, da mesma forma que constatarem que nalguns materiais como o betão essa variação foi praticamente inexistente.



Como forma de minimizar a influência da temperatura na disparidade dos resultados dos ensaios levados a cabo neste trabalho, estes decorreram numa sala climatizada. Considera-se, de acordo com os resultados apresentados na tabela 4.1, que as variações de temperatura e de humidade relativa foram pouco expressivas. Durante os ensaios os valores de temperatura e humidade relativa foram registados com recurso a um aparelho de registo sequencial HOBO U10 representado na figura 4.15. O aparelho esteve em funcionamento durante 33 dias seguidos, registando os valores das duas grandezas de 10 em 10 minutos, obtendo um total de 4747 medições de cada uma. A tabela 4.1 apresenta um resumo estatístico destes registos.



Figura 4.15 – Aparelho utilizado para medir a Temperatura e a HR da ambiência, HOBO U10.

Tabela 4.1 – Estatística descritiva dos valores registados para a temperatura e HR.

	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)
Valor médio	22,84	52,67
Valor máximo	23,79	60,44
Valor mínimo	21,06	44,17
Desvio padrão	0,695	2,513
Coeficiente de variação	3,04 %	4,77 %

#### 4.3.3. PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS

Para a preparação das soluções aquosas salinas foi necessário estudar a curva de solubilidade dos sais em estudo. Inicialmente decidiu-se que os ensaios iriam ser realizados com soluções aquosas salinas saturadas a 20 °C, uma vez que a solubilidade varia com a temperatura. Esta relação pode ser observada pelas curvas de solubilidade dos sais ensaiados, representadas na figura 4.16. De modo a controlar a temperatura e ajudar a dissolução utilizou-se um agitador magnético (figura 4.17). Como se pode observar pela figura 4.16 a curva de solubilidade do Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> aumenta expressivamente numa fase inicial, mas a partir dos 33 °C observa-se um decréscimo. Assim, decidiu-se aumentar ligeiramente a temperatura com o intuito de acelerar a reação. Por outro lado, a curva de solubilidade do KCl apresenta um aumento da solubilidade mais ligeiro em função da temperatura. Além disso, a reação do KCl com

a água é uma reação endotérmica, pelo que a temperatura baixa obtendo-se uma solução sobressaturada. Por estas razões, foi necessário aumentar bastante a temperatura do agitador magnético para contrariar este efeito.

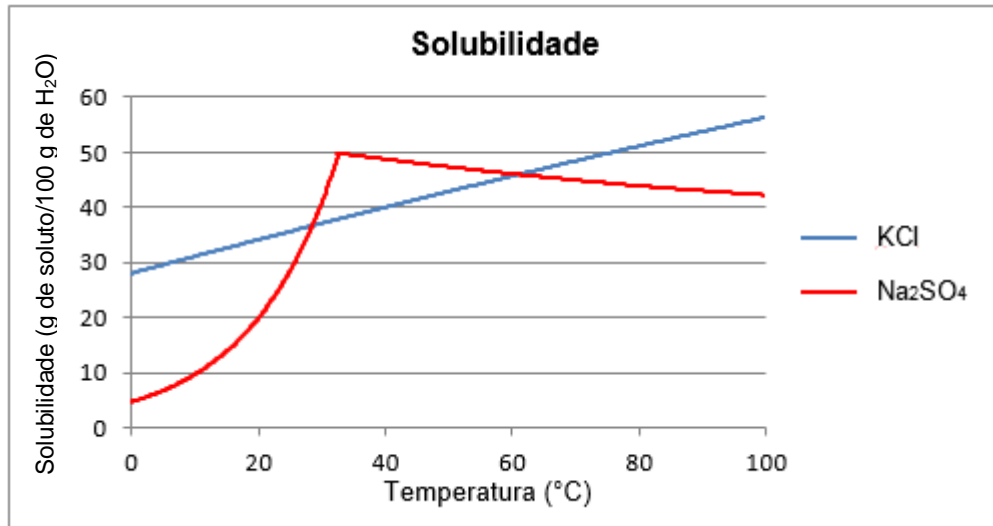


Figura 4.16 – Curva de solubilidade de KCl e Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



Figura 4.17 – Agitador magnético.

#### 4.3.4. ESCOLHA DA PERIODICIDADE DE PESAGEM

A utilização de água no processo de embebição dos provetes não altera a respetiva rede porosa, possibilitando que estes sejam novamente secos em estufa após ensaio, restituindo o seu estado original e possibilitando a repetição de ensaios nos mesmos provetes. Por este motivo, os primeiros ensaios foram realizados em água. Assim, os provetes puderam ser ensaiados sem o receio de serem danificados o que permitiu ajustar alguns parâmetros como a periodicidade da pesagem e corrigir eventuais erros. Com os primeiros ensaios em água obtiveram-se diversos resultados, como a ordem de grandeza dos coeficientes de capilaridade dos materiais utilizados (tijolo e argamassa). Por outro lado, conseguiu-se

perceber o tempo de embebição necessário para a frente húmida atingir a interface nos provetes deste tipo, bem como o patamar em todos os provetes. Assim, definiu-se a periodicidade das pesagens de acordo com o tipo de provetes a ensaiar.

No primeiro dia foram realizadas pesagens, em todos os provetes, ao minuto 1, 3, 5, 10, 15, 30, 60 e a partir daqui pelo menos de hora em hora. De um modo geral, tentou-se que os provetes fossem pesados de 2 em 2 horas no segundo dia, de 3 em 3 horas no terceiro dia e 1 vez por dia nos restantes dias. Esta temporização teve no entanto que sofrer alguns ajustes para algumas combinações interface/solução. Nos provetes com espaço de ar, a partir do momento em que a frente húmida atinge a interface os intervalos de pesagem foram alargados uma vez que o transporte de humidade na interface se processa na fase de vapor e por tal motivo, é mais lenta.

#### 4.3.5. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

A preparação dos ensaios envolve um conjunto de operações que permitem garantir a correta execução dos mesmos bem como precisão dos resultados a obter. Assim, a fase de preparação inclui os seguintes passos:

1. Verificar todo o material necessário;
2. Lavar o reservatório;
3. Nivelar o reservatório (para garantir que todos os provetes estão submersos à mesma profundidade);
4. Calibrar a balança;
5. Marcar o nível da água no reservatório correspondente à imersão dos provetes a 5 mm de profundidade;
6. Colocar os suportes no reservatório;
7. Preparar o temporizador para todas as medições a efetuar no dia;
8. Filtrar a solução aquosa previamente preparada;
9. Encher o reservatório até ao nível ideal;
10. Pesar provetes a ensaiar e registar valores.

Os ensaios propriamente ditos envolveram um conjunto de processos executados pela ordem apresentada:

1. Colocar os primeiros 3 provetes sobre o suporte com intervalos de 15 segundos e iniciar o temporizador em simultâneo;
2. Cobrir o reservatório com película aderente para evitar a evaporação;
3. Pesar o provete ao tempo suposto:
  - 3.1. Retirar o provete e parar o temporizador em simultâneo;
  - 3.2. Limpar a base submersa com pano húmido;
  - 3.3. Pesar o provete e registar valor;
  - 3.4. Colocar o provete no reservatório e iniciar o temporizador em simultâneo;
  - 3.5. Cobrir o reservatório.
4. Verificar o nível do reservatório regularmente e adicionar água/solução se necessário de forma a manter o nível mais ou menos constante;
5. Continuar as pesagens com a periodicidade prevista.

O corte dos tijolos não teve a precisão desejável constatando-se pequenas variações nas dimensões dos diferentes provetes. A quantidade de água absorvida por cada provete pode, por isso, ter sido



ligeiramente afetada por esta variação. Contudo, os resultados finais serão apresentados numa unidade que considera a quantidade de água absorvida por unidade de área, possibilitando uma correção final. Desta forma, com recurso a um paquímetro digital foram efetuadas três medições para cada uma das dimensões da base de cada provete, tendo sido utilizado o seu valor médio no cálculo da área real da base. Na sequência do cálculo da área real da base dos provetes constatou-se uma variação de até 9% face ao valor teórico de 25 cm<sup>2</sup>, pelo que a correção deste valor provou-se determinante na garantia da melhoria na precisão dos resultados dos ensaios.

#### **4.4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS**

##### **4.4.1. EFEITO DAS SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS**

Para avaliar o efeito dos diferentes sais na cinética de embebição dos provetes de tijolo, foram calculados os coeficientes de absorção por capilaridade da água e das duas soluções aquosas salinas em provetes monolíticos.

Como foi referido no capítulo 2, o coeficiente de capilaridade a calcular corresponde ao declive do primeiro troço linear da curva de embebição que expressa a quantidade de água absorvida pelo provete por unidade de área da base (kg/m<sup>2</sup>) em função da raiz quadrada do tempo (s<sup>1/2</sup>).

A quantidade de água absorvida por unidade de área no instante  $t_i$  do ensaio,  $M_{w,i}$  (kg/m<sup>2</sup>), é calculada através da equação 4.1, onde  $M_0$  (kg) corresponde à massa seca do provete,  $M_i$  (kg) à massa do provete no instante  $t_i$  e  $S$  (m<sup>2</sup>) é a área da base do provete.

$$M_{w,i} = \frac{M_i - M_0}{S} \quad (4.1)$$

As figuras 4.18, 4.19 e 4.23 apresentam as curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo obtidas nos ensaios com provetes monolíticos imersos em água, em solução saturada de sulfato de sódio e em solução saturada de cloreto de potássio, respetivamente. O coeficiente de capilaridade foi então calculado para os três provetes de cada uma destas três combinações. Nas tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam-se os coeficientes de capilaridade obtidos em cada ensaio, o seu valor médio bem como medidas de dispersão relativas, no caso o desvio padrão e o coeficiente de variação. Nalguns casos observaram-se diferenças significativas entre os valores obtidos para cada um dos três provetes, pelo que alguns resultados tiveram que ser excluídos.

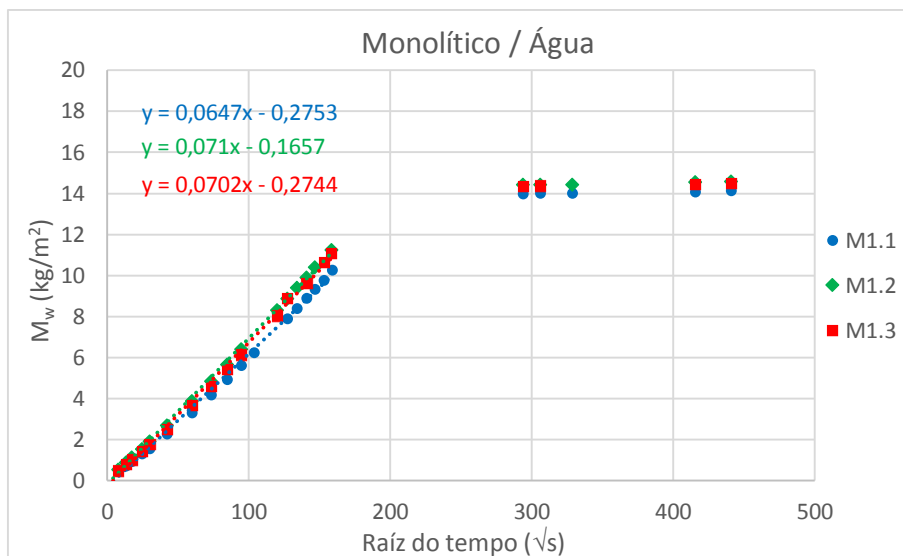


Figura 4.18 – Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes monolíticos parcialmente imersos em água.

Tabela 4.2 – Coeficiente de absorção por capilaridade de provetes monolíticos imersos em água.

Proвете	Coeficiente de capilaridade ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ )				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
M1.1	0,0647	Sim	0,0686	0,0034	5,00%
M1.2	0,0710	Sim			
M1.3	0,0702	Sim			

Os coeficientes de capilaridade dos provetes monolíticos parcialmente imersos em água registados foram muito satisfatórios, havendo uma baixa dispersão dos seus valores. Por este motivo não foi necessário excluir nenhum dos valores obtidos.

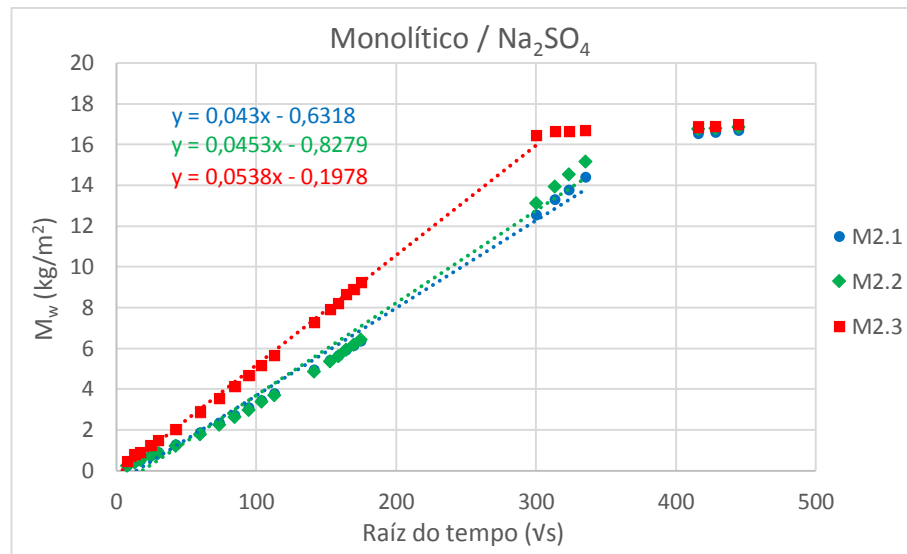


Figura 4.19 – Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes monolíticos parcialmente imersos em solução saturada de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Tabela 4.3 - Coeficiente de absorção por capilaridade de provetes monolíticos imersos em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Proвете	Coeficiente de capilaridade ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ )				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
M2.1	0,0430	Não	0,0538	-	-
M2.2	0,0453	Não			
M2.3	0,0538	Sim			

Os três provetes ensaiados com a solução saturada de sulfato de sódio apresentaram valores de coeficiente de capilaridade bastante inferiores aos observados nos ensaios de referência (com água). No entanto, comparando os valores obtidos entre si, observa-se que os coeficientes de capilaridade registrados para os provetes M2.1 e M2.2 são significativamente inferiores ao obtido no provete M2.3. Contudo considerou-se como correto este último uma vez que se verificou um atraso inesperado no início da embebição dos provetes M2.1 e M2.2.

Após análise dos provetes observou-se uma diferença nas suas bases que poderá estar na origem da disparidade dos resultados. Como já foi referido, os provetes foram produzidos a partir de tijolos de maiores dimensões que foram cortados para que os provetes tivessem as dimensões adequadas. Na sequência do corte, algumas faces dos provetes mantiveram a superfície original do tijolo enquanto outras (a maioria) ficaram com a superfície originada pelo corte. A figura 4.20 exemplifica os dois tipos de superfícies referidas.



Figura 4.20 – Bases dos provetes com superfície original do tijolo (esquerda) e superfície resultante do corte (direita).

Pressupõe-se que durante a cozedura dos tijolos aquando da sua produção, a superfície exterior adquiriu características porosas diferentes do seu interior, resultando num distinto comportamento face à água. Todos os provetes em que se verificou que a base apresentava a superfície original do tijolo, registaram atrasos no processo de embebição, o que ajuda a suportar esta teoria.

Para melhor se perceber este fenómeno, interessa observar o troço inicial da curva de absorção por capilaridade. Na figura 4.21 encontram-se representadas regressões polinomiais de 2º grau em relação aos valores observados para os três provetes com um ótimo nível de aproximação, tendo-se obtido valores de  $R^2$  muito próximos de 1. A partir das equações obtidas por regressão, calcula-se a variação do coeficiente de capilaridade em função da raiz do tempo através das suas derivadas, ao qual se designará por coeficiente de “capilaridade instantâneo”. A figura 4.22 apresenta graficamente as retas obtidas por derivação das equações referidas. Pela análise desta figura é possível verificar que inicialmente existe uma grande diferença entre os coeficientes de capilaridade instantâneos dos provetes M2.1 e M2.2 em relação ao provete M2.3 mas que, à medida que a frente húmida vai penetrando no provete, há uma tendência para a aproximação dos seus valores. Deste modo, pode-se concluir que esta análise suporta a teoria de que os diferentes tipos de base tiveram influência nos resultados obtidos.

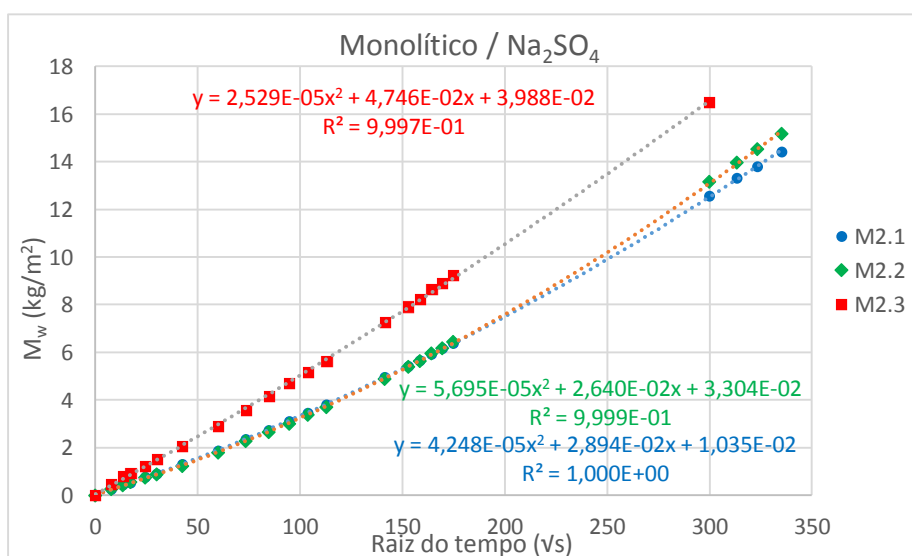


Figura 4.21 – Curvas obtidas por regressão polinomial de 2º grau em provetes monolíticos imersos em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Na figura 4.22 encontra-se representada graficamente as derivadas das funções obtidas por regressão polinomial de 2º grau ilustradas na figura 4.21. Esta figura mostra que inicialmente há uma diferença substancial entre os coeficientes de capilaridade instantâneos dos provetes M2.1 e M2.2 em relação ao provete M2.3 mas que, à medida que a frente húmida se vai afastando da base do provete, há uma tendência para a aproximação dos seus valores.

Para além dos provetes M2.1 e M2.2, também os provetes CP1.3, EA1.2, PC1.1, PC1.3, EA2.3, PC3.1 e PC3.2 têm a superfície original dos tijolos como base, registando-se valores de coeficiente de capilaridade muito baixos em todos eles. Houve no entanto outros provetes que tiveram que ser excluídos por apresentarem resultados desviantes, embora com diferenças menos expressivas. Esses resultados desviantes podem ser justificados pela possível heterogeneidade da estrutura porosa dos provetes ou até mesmo com erros na preparação e/ou no ensaio dos mesmos.

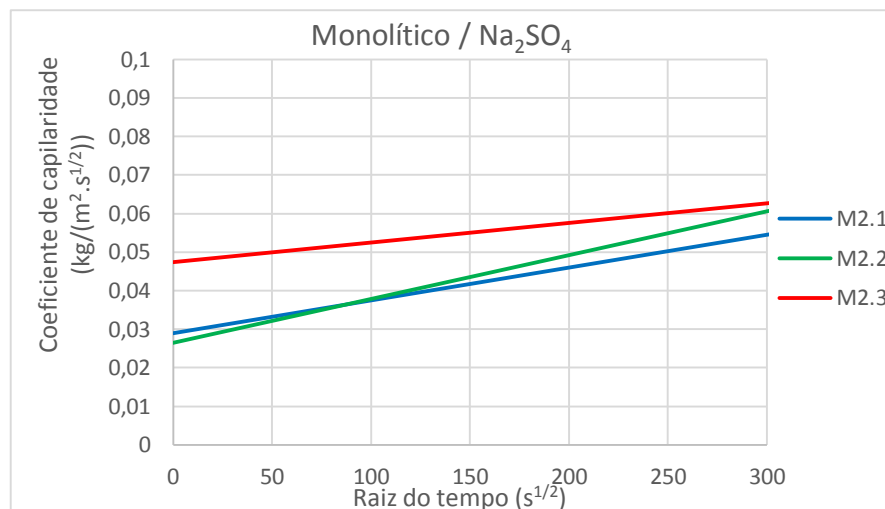


Figura 4.22 – Retas obtidas por derivação das equações polinomiais de 2º grau dos provetes monolíticos imersos em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

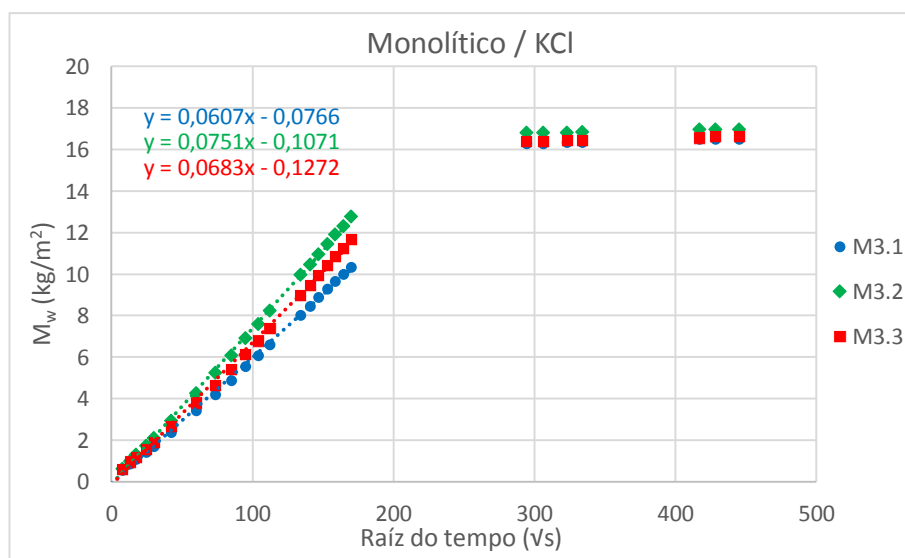


Figura 4.23 – Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes monolíticos parcialmente imersos em solução saturada de KCl.

Na figura 4.23 é possível observar-se uma interrupção de valores a meio da curva de absorção, que não permite o acompanhamento mais detalhado da curva até esta atingir o patamar. Isto deve-se ao facto do processo de embebição dos provetes ensaiados durante este trabalho ser bastante lento, levando alguns dias a finalizar os ensaios. Assim, durante a parte da noite (entre as 18h e as 9h) não é possível fazer pesagens, o que explica as interrupções presentes nas curvas deste e de outros gráficos.

Tabela 4.4 - Coeficiente de absorção por capilaridade de provetes monolíticos imersos em KCl.

Proвете	Coeficiente de capilaridade ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ )				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
M3.1	0,0607	Não	0,0717	0,0048	6,71%
M3.2	0,0751	Sim			
M3.3	0,0683	Sim			

Nos ensaios com cloreto de potássio, verifica-se uma dispersão entre os três valores. No entanto optou-se por excluir o resultado do provete M3.1 por se afastar mais do valor esperado e do valor médio calculado para o coeficiente de capilaridade dos provetes com interface em cloreto de potássio, que serão abordados no ponto 4.3.2. O coeficiente de capilaridade médio obtido foi um pouco superior ao verificado nos ensaios com água.

Os coeficientes de capilaridade calculados para as três soluções são bastante diferentes dos registados por J. Azevedo [21] uma vez que a autora obteve valores de coeficiente de capilaridade de 0,1448, 0,1159 e 0,1673 em provetes parcialmente imersos em água, solução saturada de sulfato de sódio e solução saturada de cloreto de potássio, respetivamente. No entanto verificou-se, neste trabalho, uma diminuição do coeficiente de capilaridade no caso do sulfato de sódio e um aumento no caso do cloreto de potássio em relação aos ensaios efetuados com água, tal como foi constatado por J. Azevedo [21]. Diferentes características porosas de cada tipo de tijolo utilizado nos dois trabalhos podem estar na origem das diferenças observadas. A tabela 4.5 mostra diferentes valores de coeficiente de capilaridade de provetes de tijolo maciço imersos em água, onde se pode constatar diferenças entre eles, mas que o valor obtido no presente estudo encontra-se dentro do intervalo de valores registados nos trabalhos referidos.

Tabela 4.5 – Coeficiente de capilaridade de tijolo maciço imerso em água obtido por outros autores.

Autor	Coeficiente de capilaridade ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ )
J. Azevedo [21]	0,1448
Freitas <i>et al.</i> [8]	0,05
Mukhopadhyaya <i>et al.</i> [38]	0,084

A figura 4.24 apresenta uma comparação gráfica dos coeficientes de capilaridade registados nos provetes monolíticos para cada uma das soluções utilizadas.

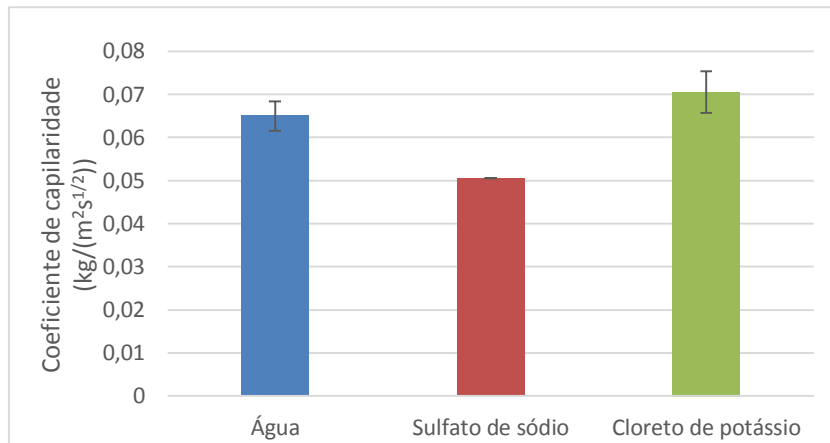


Figura 4.24 – Coeficiente de capilaridade de provetes monolíticos imersos nas soluções em estudo.

#### 4.4.2. EFEITO DA EXISTÊNCIA E DO TIPO DE INTERFACE

Para avaliar a influência de diferentes tipos de interface na cinética de embebição dos provetes de tijolo em água foram calculados os fluxos máximos transmitidos (FLUMAX) para cada tipo de interface.

Como foi referido no capítulo 3, o FLUMAX corresponde ao declive da aproximação linear da curva de absorção por capilaridade em função do tempo após se verificar a descontinuidade, ou seja, depois de se atingir a interface.

As figuras 4.25, 4.26 e 4.27 apresentam as curvas de absorção de água por capilaridade de provetes com interface de contacto perfeito, espaço de ar e pasta de contacto. Respetivamente nas tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 será efetuado um resumo estatístico dos valores obtidos, sendo possível observar os valores individuais calculados para cada provete assim como o valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados considerados.

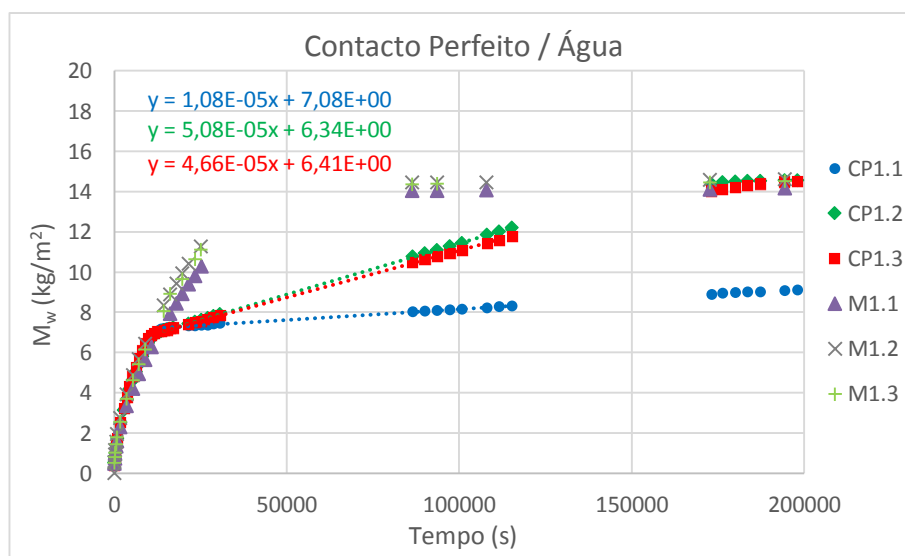


Figura 4.25 – Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes de contacto perfeito parcialmente imersos em água.

Tabela 4.6 – FLUMAX em provetes contacto perfeito imersos em água.

Proвете	FLUMAX (kg/(m <sup>2</sup> .s))				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
CP1.1	$10,8 \times 10^{-6}$	Não	$48,7 \times 10^{-6}$	$2,97 \times 10^{-6}$	6,10%
CP1.2	$50,8 \times 10^{-6}$	Sim			
CP1.3	$46,6 \times 10^{-6}$	Sim			

O provete CP1.1 apresentou uma resistência hídrica muito elevada, traduzindo-se num fluxo máximo transmitido bastante baixo quando comparado com os resultados obtidos nos outros dois provetes e por V. Freitas [29]. Este valor pode ser explicado por existir um mau contacto entre as superfícies de tijolo na interface. Por este motivo rejeitou-se o resultado obtido no provete CP1.1. Em contrapartida, o valor médio de fluxo máximo transmitido na interface dos restantes provetes está muito próximo do obtido por V. Freitas em provetes de tijolo [29], correspondente a  $44 \times 10^{-6}$  kg/(m<sup>2</sup>.s).

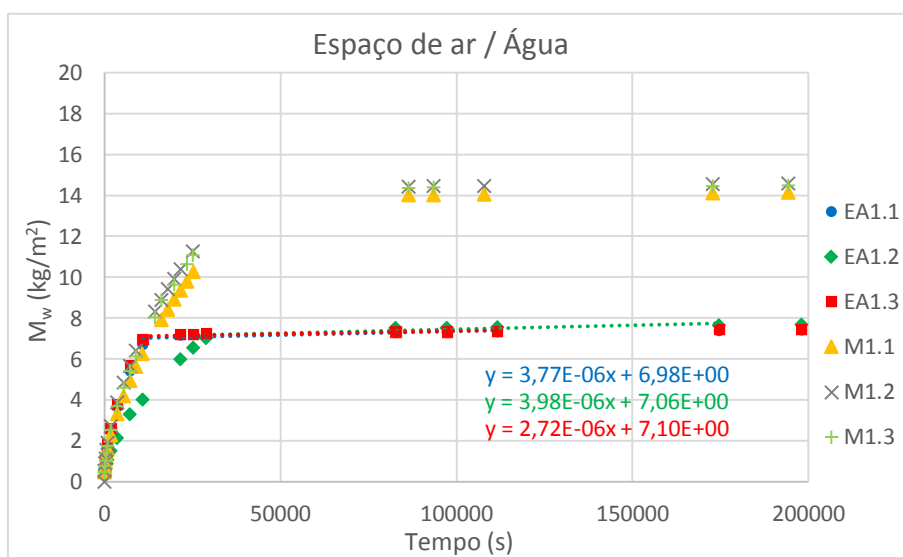


Figura 4.26 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes espaço de ar parcialmente imersos em água.

Tabela 4.7 - FLUMAX em provetes espaço de ar imersos em água.

Proвете	FLUMAX (kg/(m <sup>2</sup> .s))				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
EA1.1	$3,77 \times 10^{-6}$	Sim	$3,88 \times 10^{-6}$	$1,48 \times 10^{-7}$	3,83%
EA1.2	$3,98 \times 10^{-6}$	Sim			
EA1.3	$2,72 \times 10^{-6}$	Não			



No que diz respeito ao fluxo máximo transmitido na interface de espaço de ar em provetes embebidos em água optou-se por excluir o resultado verificado no provete EA1.3, por se afastar significativamente dos restantes. No entanto, os resultados obtidos nos provetes EA1.1 e EA1.2 foram muito satisfatórios, aproximando-se bastante do valor médio obtido por V. Freitas [29] em provetes com espaço de ar de 2 a 4 mm, correspondente a  $4 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2.\text{s})$ .

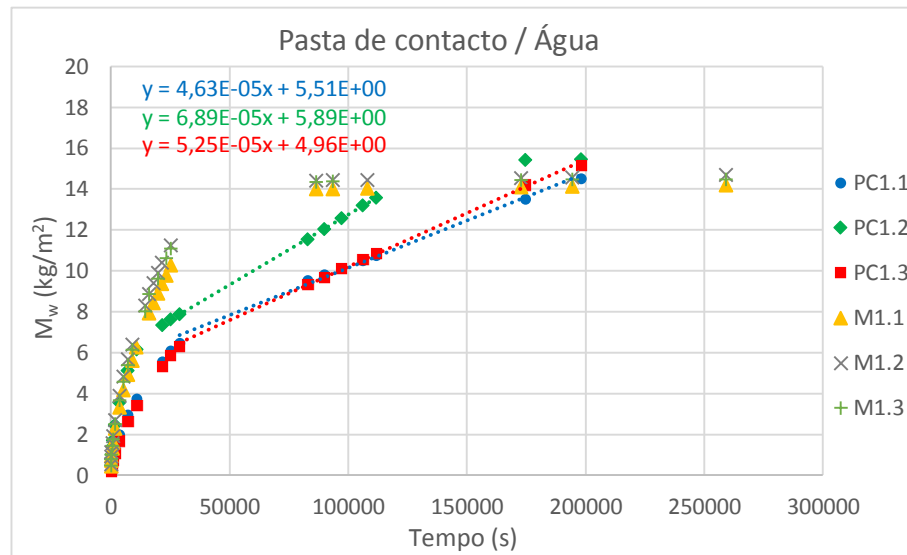


Figura 4.27 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes pasta de contacto parcialmente imersos em água.

Tabela 4.8 - FLUMAX em provetes pasta de contacto imersos em água.

Proвете	FLUMAX ( $\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$ )				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
PC1.1	$46,3 \times 10^{-6}$	Não	$68,9 \times 10^{-6}$	-	-
PC1.2	$68,9 \times 10^{-6}$	Sim			
PC1.3	$52,5 \times 10^{-6}$	Não			

Os valores de FLUMAX calculados para os provetes com pasta de contacto manifestam alguma dispersão, principalmente no provete PC1.2 face aos restantes. No entanto, se por um lado os provetes PC1.1 e PC1.3 apresentam valores de fluxo máximo transmitido próximos entre si, o provete PC1.2 apresentou uma curva de absorção em função da raiz do tempo muito mais próxima do expectável. Como se pode observar na figura 4.28, conseguem-se distinguir os três troços lineares de embebição das três camadas que compõem os provetes, sendo que os troços que correspondem à embebição das camadas de tijolo têm um declive superior ao da camada de argamassa. Em contrapartida, nos provetes PC1.1 e PC1.3 praticamente não se consegue distinguir estas três fases de embebição, uma vez que os coeficientes de capilaridade da primeira camada de tijolo foram demasiado baixos. Nestes dois provetes, quando a frente húmida está prestes a atingir a interface, o fluxo de humidade é inferior ao fluxo máximo

transmitido pela interface do provete PC1.2. Pode-se concluir que o fluxo máximo transmitido dos provetes PC1.1 e PC1.3 é limitado pelo baixo transporte capilar da camada de tijolo e não pela interface. Por este motivo, considerou-se apenas o valor obtido no provete PC1.2.

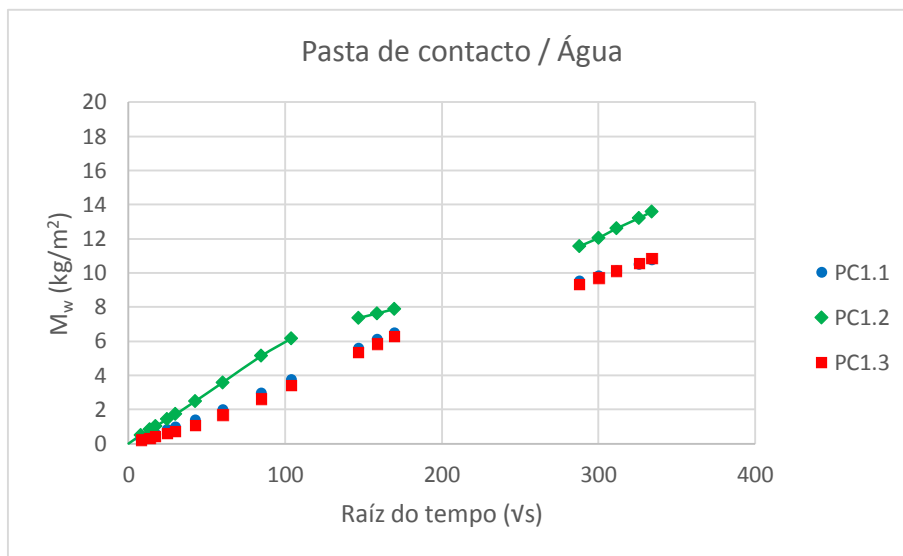


Figura 4.28 – Análise dos troços lineares da curva de absorção, em função da raiz do tempo, dos provetes de pasta de contacto parcialmente imersos em água.

#### 4.4.3. EFEITO DE SOLUÇÕES AQUOSAS SALINAS NOS PROCESSOS DE EMBEBIÇÃO DE PROVETES COM MÚLTIPLAS CAMADAS

##### 4.4.3.1. Influência no coeficiente de capilaridade da primeira camada

Analisando os resultados obtidos relativamente ao coeficiente de capilaridade de provetes com diferentes interfaces, percebe-se que não existem diferenças significativas entre o coeficiente de capilaridade das diferentes interfaces. Por esta razão, optou-se por agrupar os resultados obtidos para todas as interfaces e compara-los com os coeficientes de capilaridade obtidos nos provetes monolíticos. Assim, foram calculados os valores médios do coeficiente de capilaridade e os respetivos desvio padrão e coeficiente de variação para cada solução utilizada, considerando todos os tipos de interface em conjunto. Da figura 4.29 à 4.37 estão representados as curvas de absorção de capilaridade em função da raiz do tempo para todas as combinações com interface estudadas. Nas tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam-se os coeficientes de capilaridade obtidos em cada ensaio, o seu valor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

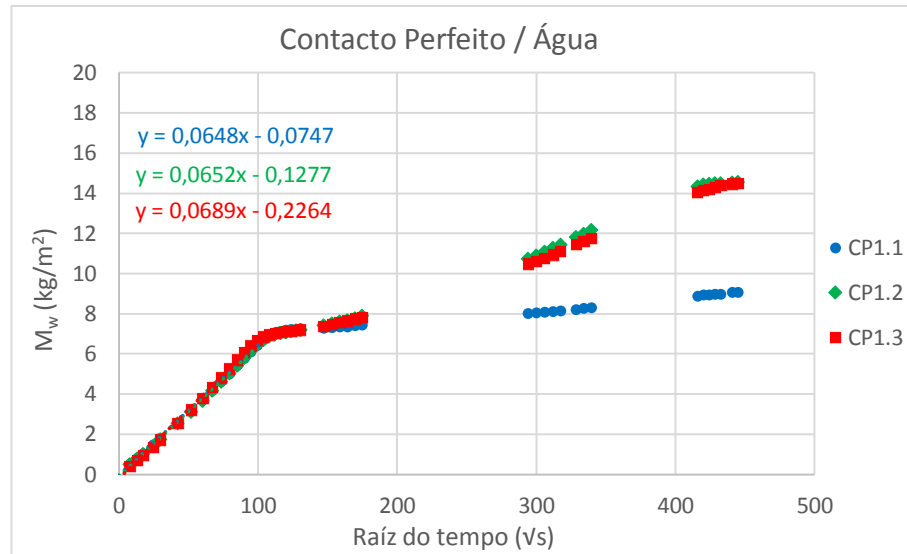


Figura 4.29 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes contacto perfeito parcialmente imersos em água.

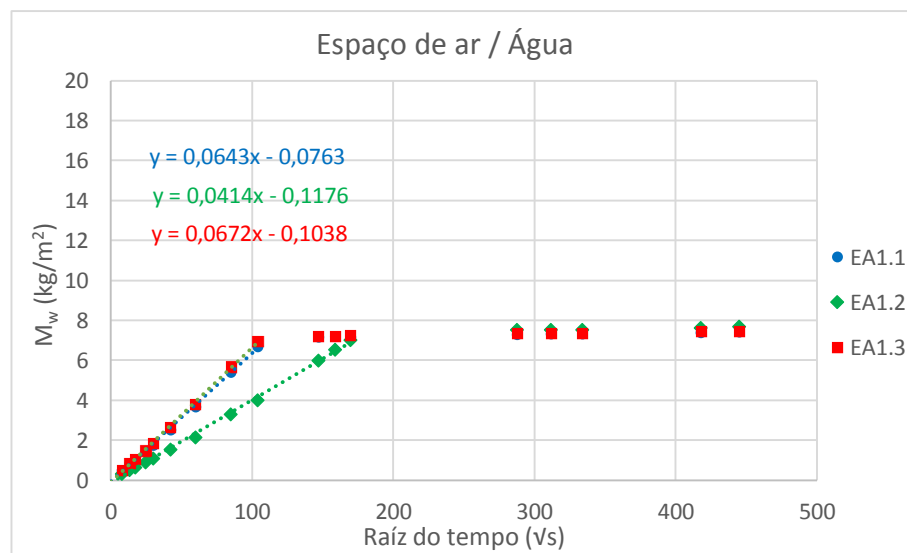


Figura 4.30 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes espaço de ar parcialmente imersos em água.

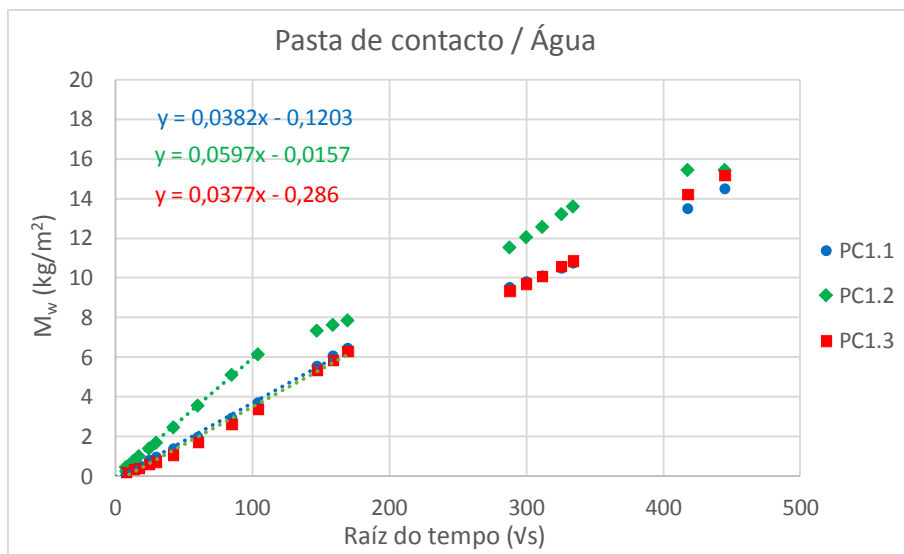


Figura 4.31 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes pasta de contacto parcialmente imersos em água.

Tabela 4.9 - Coeficiente de absorção por capilaridade de provetes com interface parcialmente imersos em água.

Proвете	Coeficiente de capilaridade (kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ))				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
CP1.1	0,0648	Sim	0,0650	0,0031	4,80%
CP1.2	0,0652	Sim			
CP1.3	0,0689	Sim			
EA1.1	0,0643	Sim			
EA1.2	0,0414	Não			
EA1.3	0,0672	Sim			
PC1.1	0,0382	Não			
PC1.2	0,0597	Sim			
PC1.3	0,0377	Não			

Para o cálculo do coeficiente de capilaridade médio dos provetes com interface parcialmente imersos em água foram excluídos os provetes EA1.2, PC1.1 e PC1.3 por apresentarem resultados muito afastados dos restantes. Em relação aos restantes provetes obteve-se resultados muito próximos, tendo-se verificado apenas uma pequena diferença no coeficiente de capilaridade do provete PC1.2 que não se considerou relevante. Comparando com o coeficiente de capilaridade médio obtido nos provetes monolíticos, constata-se uma pequena diminuição do mesmo no caso dos provetes com interface.

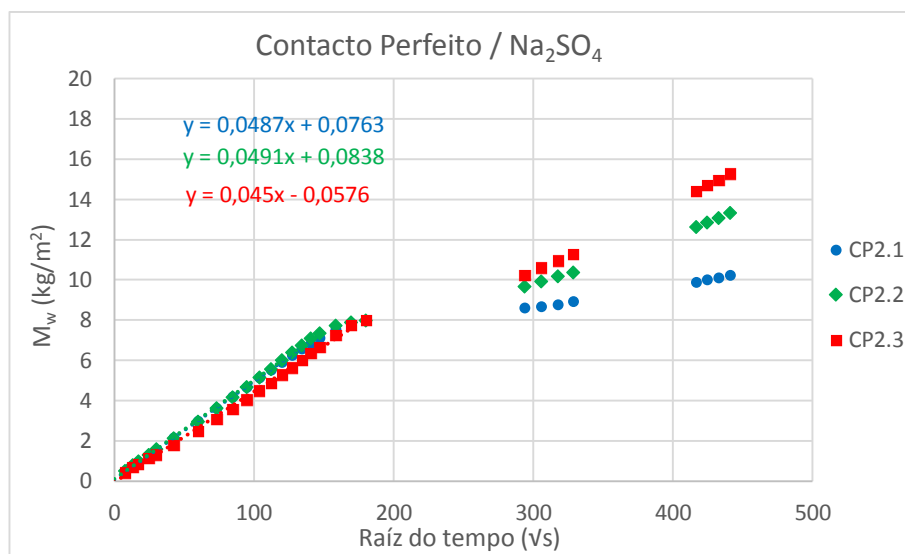


Figura 4.32 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes contacto perfeito parcialmente imersos em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

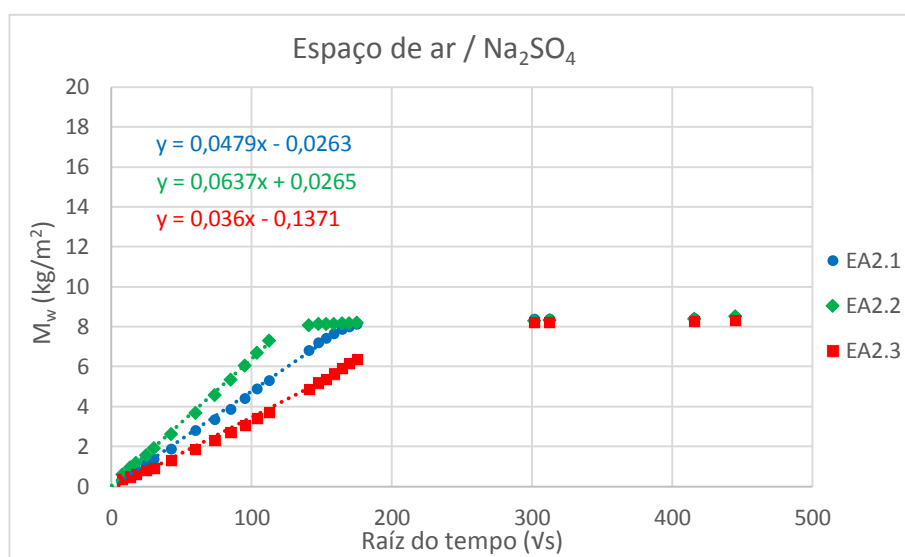


Figura 4.33 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes espaço de ar parcialmente imersos em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

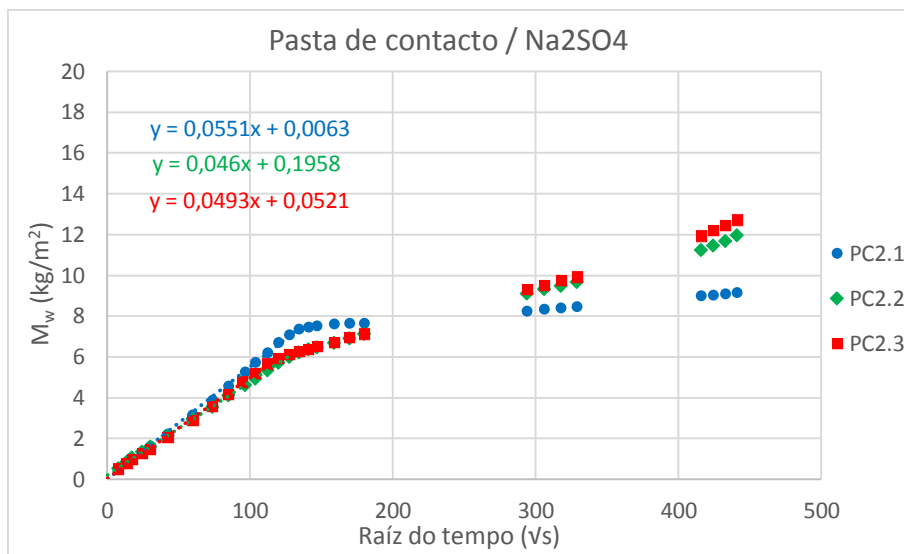


Figura 4.34 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes pasta de contacto parcialmente imersos em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Tabela 4.10 - Coeficiente de absorção por capilaridade de provetes com interface parcialmente imersos em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Proвете	Coeficiente de capilaridade (kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ))				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
CP2.1	0,0487	Sim	0,0487	0,0032	6,65%
CP2.2	0,0491	Sim			
CP2.3	0,0450	Sim			
EA2.1	0,0479	Sim			
EA2.2	0,0637	Não			
EA2.3	0,0360	Não			
PC2.1	0,0551	Sim			
PC2.2	0,0460	Sim			
PC2.3	0,0493	Sim			

No caso dos provetes com interface imersos em sulfato de sódio, foram excluídos os coeficientes de capilaridade dos provetes EA2.2 e EA2.3 por se afastarem consideravelmente dos restantes. O coeficiente de capilaridade neste caso também foi inferior ao calculado para os provetes monolíticos embebidos em solução de sulfato de sódio.

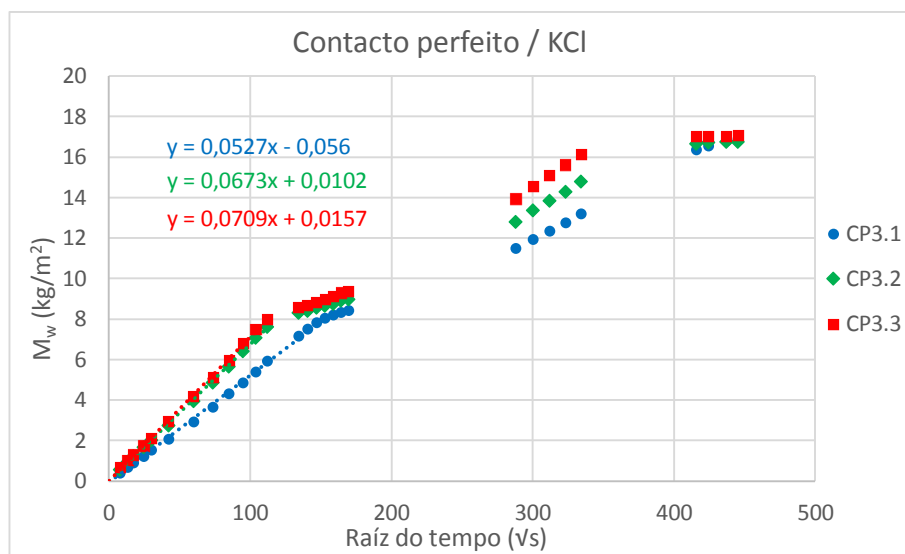


Figura 4.35 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes contacto perfeito parcialmente imersos em KCl.

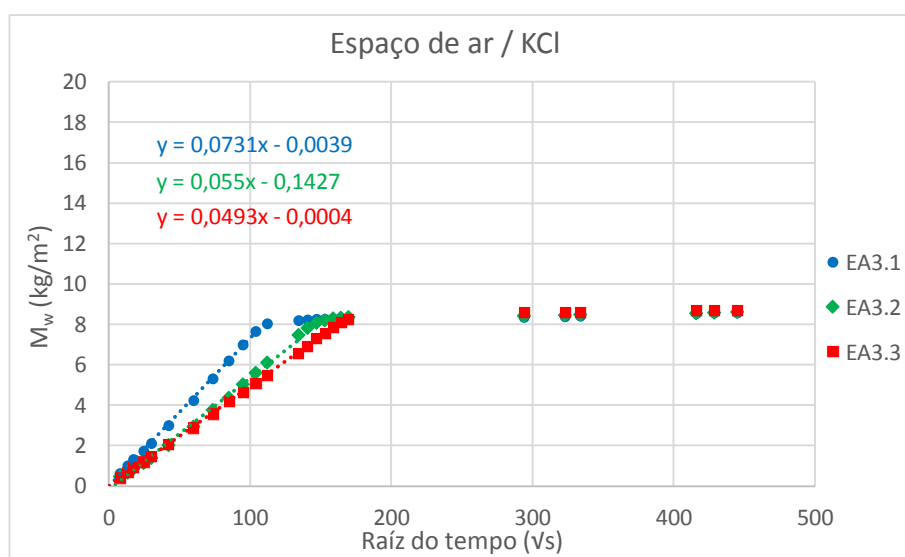


Figura 4.36 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes espaço de ar parcialmente imersos em KCl.

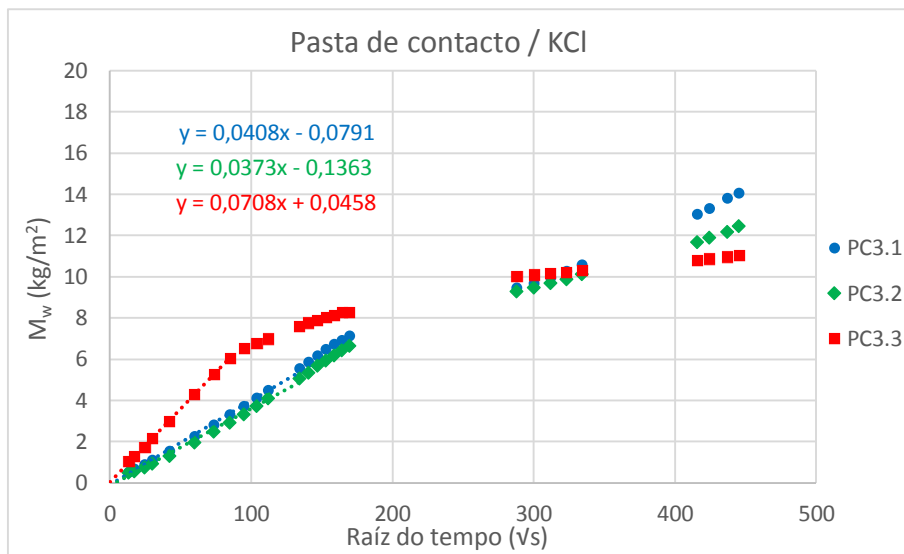


Figura 4.37 - Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes pasta de contacto parcialmente imersos em KCl.

Tabela 4.11 - Coeficiente de absorção por capilaridade de provetes com interface parcialmente imersos em KCl.

Proвете	Coeficiente de capilaridade ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ )				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
CP3.1	0,0527	Não	0,0705	0,0023	3,40%
CP3.2	0,0673	Sim			
CP3.3	0,0709	Sim			
EA3.1	0,0731	Sim			
EA3.2	0,0550	Não			
EA3.3	0,0493	Não			
PC3.1	0,0408	Não			
PC3.2	0,0373	Não			
PC3.3	0,0708	Sim			

No caso dos provetes com interface imersos em solução de cloreto de potássio, houve muitos resultados desviantes, tendo sido excluídos os provetes CP3.1, EA3.2, EA3.3, PC3.1 e PC3.2. Os restantes provetes apresentaram resultados homogêneos. Tal como nos provetes com interface imersos em água e em solução de sulfato de sódio, o mesmo tipo de provetes imersos em solução de potássio apresentou igualmente uma ligeira diminuição no coeficiente de capilaridade face aos monolíticos.

A figura 4.38 apresenta uma comparação gráfica entre os coeficientes de capilaridade dos provetes monolíticos para cada uma das soluções utilizadas e os coeficientes de capilaridade dos provetes com interface ensaiados com as mesmas soluções. Nesta figura constata-se que os provetes com interface



apresentam um coeficiente de capilaridade ligeiramente inferior aos provetes monolíticos em qualquer uma das soluções, como já tinha sido referido. No entanto este facto não se deve à influência da interface na cinética de embebição da camada de tijolo inferior do provete mas sim à altura da mesma. Como vimos no ponto 4.3.1. o coeficiente de capilaridade instantâneo aumenta ligeiramente à medida que a frente húmida avança no provete, podendo concluir-se que em camadas com maior espessura o coeficiente de capilaridade será maior, assim como se verifica nos provetes monolíticos (10 cm) em relação aos provetes com interface (5 cm da primeira camada).

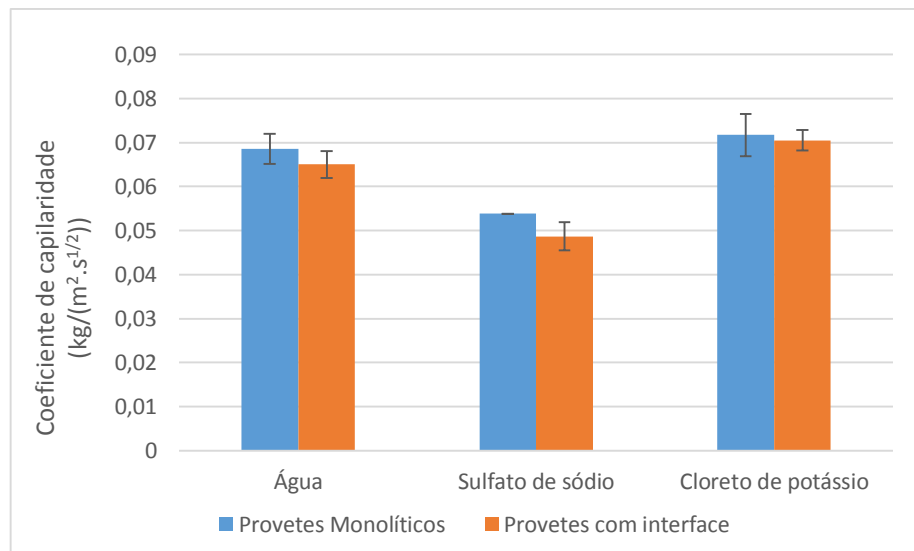


Figura 4.38 – Coeficiente de capilaridade de provetes monolíticos e com interface imersos nas soluções em estudo.

#### 4.4.3.2. Influência na resistência hídrica da interface

Para avaliar a resistência hídrica promovida pela interface em provetes embebidos em soluções aquosas salinas foram calculados os FLUMAX para os três tipos de interface em cada um dos sais em estudo.

As figuras 4.39 e 4.40 apresentam as curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com interface de contacto perfeito imersos em solução saturada de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e  $\text{KCl}$ , respetivamente. Por sua vez nas tabelas 4.12 e 4.13 será feito um resumo estatístico dos valores obtidos, sendo possível observar os valores individuais calculados para cada provete assim como o valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados tomados em consideração.

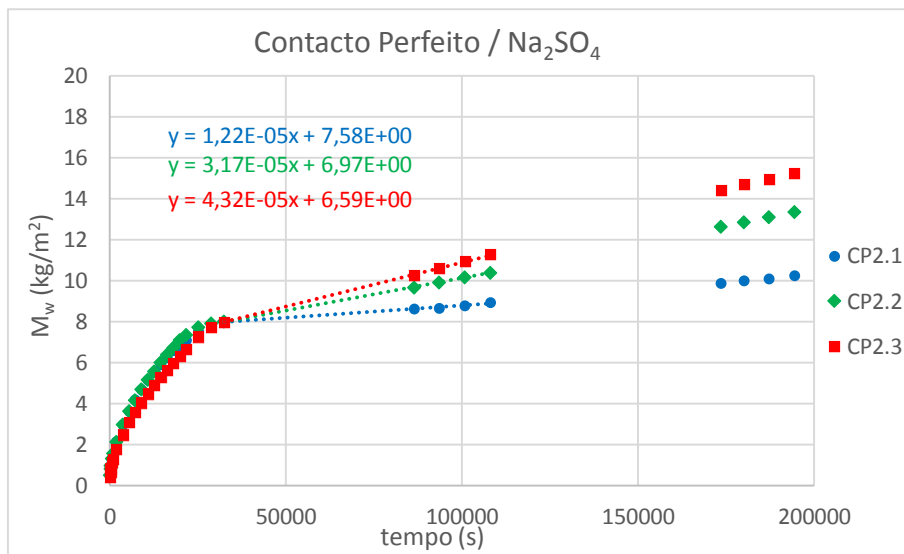


Figura 4.39 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes contacto perfeito parcialmente imersos em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Tabela 4.12 – FLUMAX em provetes contacto perfeito parcialmente imersos em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Provete	FLUMAX (kg/(m <sup>2</sup> .s))				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
CP2.1	12,2 × 10 <sup>-6</sup>	Não	37,4 × 10 <sup>-6</sup>	8,132 × 10 <sup>-6</sup>	21,7%
CP2.2	31,7 × 10 <sup>-6</sup>	Sim			
CP2.3	43,2 × 10 <sup>-6</sup>	Sim			

Os fluxos máximos transmitidos dos provetes de contacto perfeito em sulfato de sódio apresentaram grande dispersão, no entanto optou-se por excluir apenas o valor registado para o provete CP2.1, pois foi o que se afastou mais dos restantes. Os resultados mostram que o sulfato de sódio provocou uma diminuição do fluxo máximo face aos resultados registados com provetes de contacto perfeito em água.

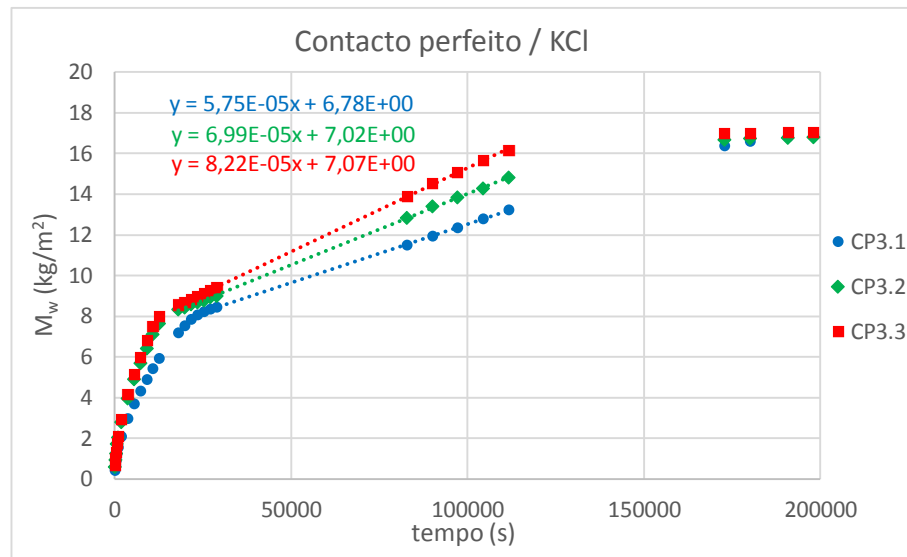


Figura 4.40 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes contacto perfeito parcialmente imersos em KCl.

Tabela 4.13 – FLUMAX em provetes contacto perfeito parcialmente imersos em KCl.

Proвете	FLUMAX (kg/(m <sup>2</sup> .s))				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
CP3.1	$57,5 \times 10^{-6}$	Sim	$69,8 \times 10^{-6}$	$12,4 \times 10^{-6}$	17,68%
CP3.2	$69,9 \times 10^{-6}$	Sim			
CP3.3	$82,2 \times 10^{-6}$	Sim			

Os três provetes apresentaram fluxos máximos transmitidos com alguma dispersão. Ainda assim é possível verificar que qualquer um dos três valores obtidos é superior aos registados nos ensaios com interface de contacto perfeito em água. Apesar da dispersão verificada nos resultados, optou-se por considerar os três valores no cálculo do fluxo máximo transmitido médio, uma vez que o intervalo entre os três é semelhante.

Comparando o fluxo máximo transmitido na interface de contacto perfeito em provetes imersos em diferentes soluções, percebe-se que este segue a mesma tendência que o coeficiente de capilaridade para as três soluções. Assim, o FLUMAX será superior no caso de provetes imersos em cloreto de potássio em relação à água e inferior quando imersos em solução de sulfato de sódio. Na figura 4.41 apresenta-se uma comparação gráfica entre os resultados obtidos para estes três casos.

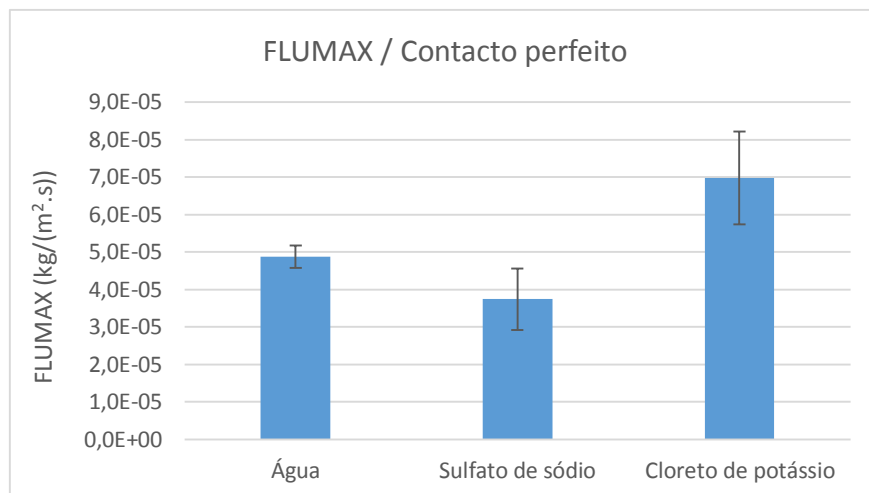


Figura 4.41 – FLUMAX em provetes com interface de contacto perfeito

As figuras 4.42 e 4.43 apresentam as curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com espaço de ar imersos em solução saturada de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e  $\text{KCl}$ , respetivamente. Por sua vez nas tabelas 4.14 e 4.15 será feito um resumo estatístico dos valores obtidos, sendo possível observar os valores individuais calculados para casa provete assim como o valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados tomados em consideração.

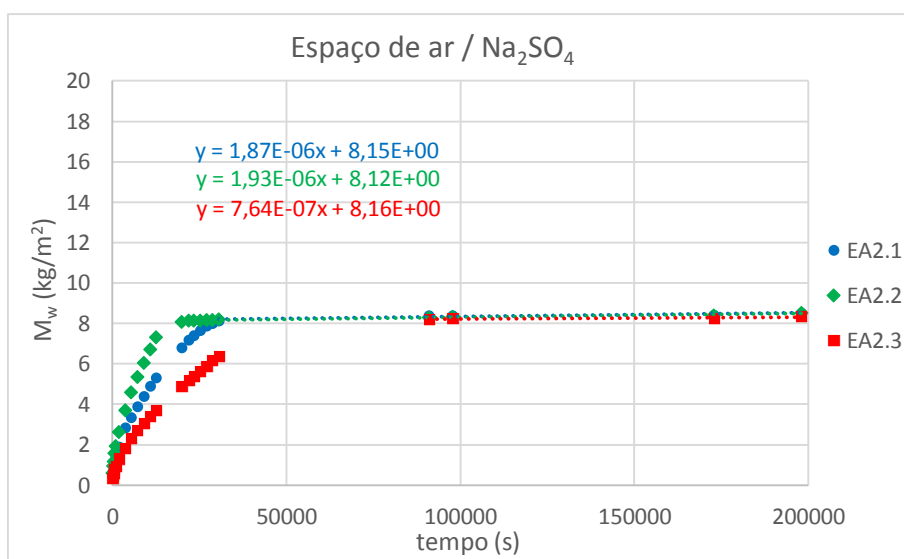


Figura 4.42 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com espaço de ar parcialmente imersos em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Tabela 4.14 – FLUMAX em provetes com espaço de ar parcialmente imersos em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Proвете	FLUMAX (kg/(m <sup>2</sup> .s))				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
EA2.1	1,87 × 10 <sup>-6</sup>	Sim	1,90 × 10 <sup>-6</sup>	4,24 × 10 <sup>-8</sup>	2,23%
EA2.2	1,93 × 10 <sup>-6</sup>	Sim			
EA2.3	0,76 × 10 <sup>-6</sup>	Não			

No que diz respeito aos resultados de provetes com espaço de ar ensaiados em sulfato de sódio observou-se uma grande proximidade entre os valores de fluxo máximo transmitidos nos provetes EA2.1 e EA2.2. O provete EA2.3 apresentou um resultado bastante afastado dos restantes pelo que foi excluído. Os resultados mostram uma redução considerável do fluxo máximo transmitidos em relação aos ensaios de provetes com espaço de ar em água.

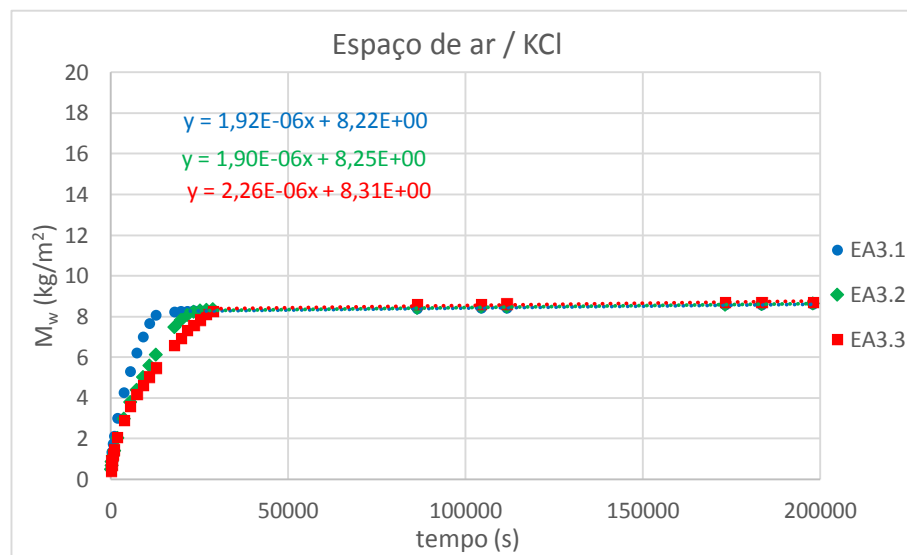


Figura 4.43 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com espaço de ar parcialmente imersos em KCl.

Tabela 4.15 - FLUMAX em provetes com espaço de ar parcialmente imersos em KCl.

Proвете	FLUMAX (kg/(m <sup>2</sup> .s))				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
EA3.1	1,92 × 10 <sup>-6</sup>	Sim	2,03 × 10 <sup>-6</sup>	2,02 × 10 <sup>-7</sup>	9,98%
EA3.2	1,90 × 10 <sup>-6</sup>	Sim			
EA3.3	2,26 × 10 <sup>-6</sup>	Sim			

Os resultados obtidos nos provetes com espaço de ar embebidos em solução de cloreto de potássio foram bastante satisfatórios, registrando-se alguma proximidade entre os valores obtidos para os três provetes. O resultado mostra uma diminuição do fluxo máximo transmitido face ao ensaio de referência.

Analisando os resultados dos ensaios de provetes com espaço de ar embebidos em diferentes soluções, constata-se que a utilização de qualquer uma das soluções salinas traduz-se numa redução do fluxo máximo transmitido para cerca de metade do valor registado nos ensaios com água, sendo no caso do cloreto de potássio apenas ligeiramente superior ao do sulfato de sódio. Estes resultados parecem fazer sentido, uma vez que o transporte de humidade neste tipo de interface se processa em fase de vapor. Assim, a quantidade de moléculas de água disponível para evaporação na interface será muito inferior no caso das soluções salinas, em comparação com a água destilada. Para além desse fator, verificou-se a cristalização na interface durante os ensaios, pelo que os cristais formados podem, de alguma forma, dificultar a saída de água pela superfície cristalizada. A figura 4.44 apresenta graficamente os resultados obtidos nos provetes com espaço de ar para as diferentes soluções utilizadas.

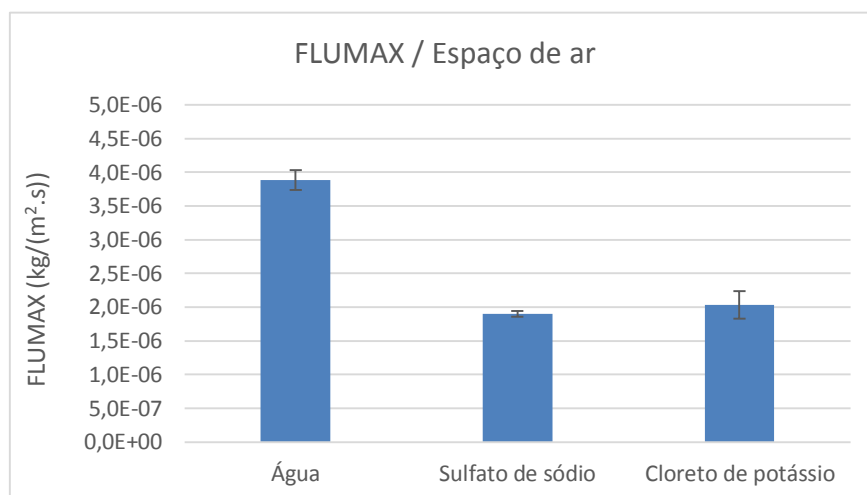


Figura 4.44 – FLUMAX em provetes de interface com espaço de ar.

As figuras 4.45 e 4.46 apresentam as curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com pasta de contacto imersos em solução saturada de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e  $\text{KCl}$ , respetivamente. Por sua vez nas tabelas 4.16 e 4.17 será apresentado um resumo estatístico dos valores obtidos, sendo possível observar os valores individuais calculados para cada provete assim como o valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados tomados em consideração.

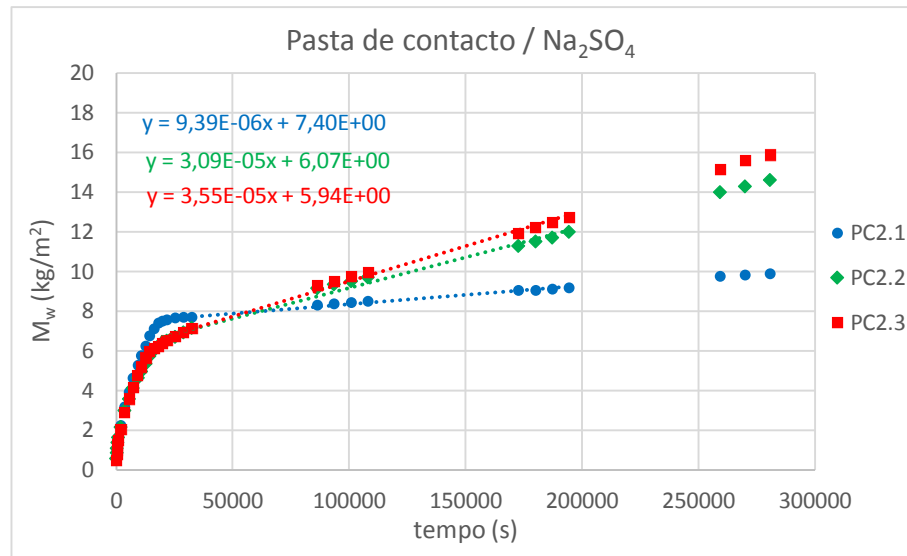


Figura 4.45 - Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com pasta de contacto parcialmente imersos em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Tabela 4.16 – FLUMAX em provetes com pasta de contacto parcialmente imersos em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Proвете	FLUMAX (kg/(m <sup>2</sup> .s))				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
PC2.1	$9,39 \times 10^{-6}$	Não	$33,2 \times 10^{-6}$	$3,25 \times 10^{-6}$	9,79%
PC2.2	$30,9 \times 10^{-6}$	Sim			
PC2.3	$35,5 \times 10^{-6}$	Sim			

Nos ensaios com provetes com interface de contacto hidráulico (pasta de contacto) parcialmente imersos em solução de sulfato de sódio foi excluído o valor de FLUMAX calculado para o provete PC2.1 por se afastar bastante dos valores calculados para os provetes PC2.2 e PC2.3. O valor médio obtido nestes ensaios foi bastante inferior ao obtido nos ensaios com água, o que seria expectável, tendo em conta que existe continuidade na estrutura porosa e que os coeficientes de capilaridade dos provetes ensaiados com sulfato de sódio também foram inferiores aos ensaiados com água.

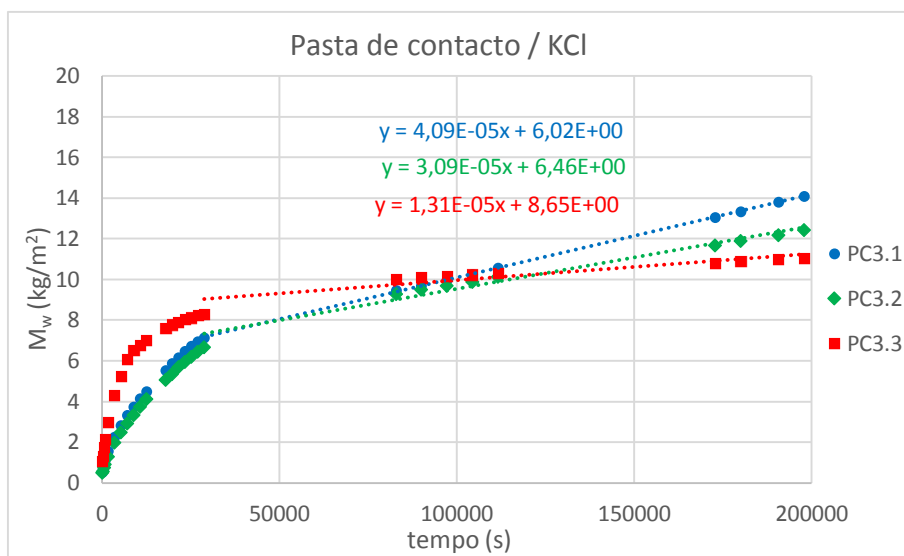


Figura 4.46- Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com pasta de contacto parcialmente imersos em KCl.

Tabela 4.17 – FLUMAX em provetes com pasta de contacto parcialmente imersos em KCl.

Proвете	FLUMAX (kg/(m <sup>2</sup> .s))				
	Valor individual	Valor considerado	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
PC3.1	$40,9 \times 10^{-6}$	Sim	$35,9 \times 10^{-6}$	$7,07 \times 10^{-6}$	19,7%
PC3.2	$30,9 \times 10^{-6}$	Sim			
PC3.3	$13,1 \times 10^{-6}$	Não			

No caso dos provetes com pasta de contacto ensaiados com cloreto de potássio obtiveram-se resultados heterogêneos e que dificilmente correspondem ao valor real. Se por um lado os provetes PC3.1 e PC3.2 refletem valores de FLUMAX relativamente baixos que podem ser explicados pela reduzida permeabilidade da primeira camada de tijolo que, como foi referido anteriormente, apresenta a superfície original do tijolo, o provete PC3.3 apresenta um fluxo máximo transmitido na interface ainda inferior, que pode estar relacionado com algum erro na execução da camada de argamassa. Neste caso seria expectável que o fluxo máximo transmitido fosse superior ao dos provetes com pasta de contacto ensaiados em água, algo que não se verificou. Considera-se, por isso, que apesar de terem sido considerados os provetes PC3.1 e PC3.2 no cálculo do valor médio, este pode não corresponder ao valor real.

De um modo geral, os resultados obtidos nos ensaios com camada intermédia de argamassa não foram muito conclusivos uma vez que houve uma grande dispersão em quase todos os resultados das três combinações ensaiadas. Os fluxos máximos transmitidos calculados para os dois tipos de soluções salinas encontram-se muito próximos entre si e bastante inferiores ao calculado para a água, quando se esperaria uma diferença semelhante, em termos relativos, ao que se observou nos coeficientes de capilaridade, visto que este tipo de interface se caracteriza por apresentar uma continuidade na estrutura



porosa. Na figura 4.47 sintetizam-se os resultados obtidos neste tipo de interface para os três tipos de solução.

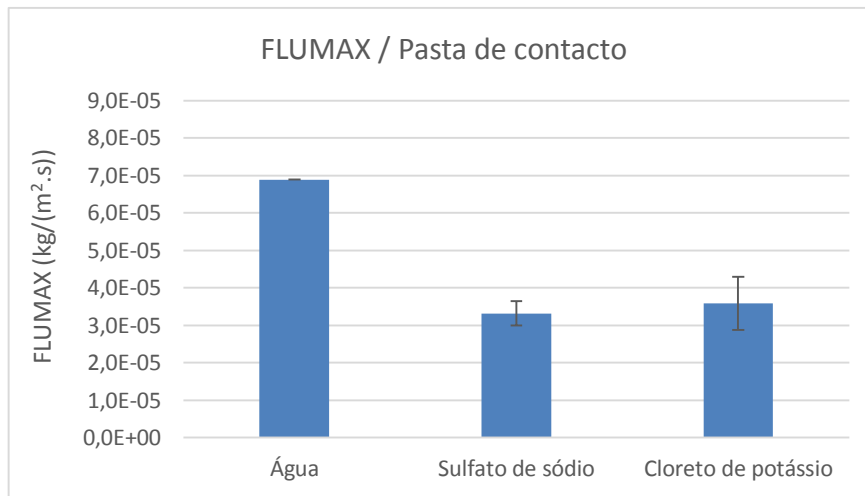


Figura 4.47 – FLUMAX em provetes de interface com pasta de contacto.

#### 4.4.4. SECAGEM PARCIAL DOS PROVETES

Na sequência dos ensaios de embebição anteriormente descritos, procedeu-se à secagem dos respetivos provetes. Para tal, inicialmente impermeabilizou-se a base de todos provetes com película aderente de modo a que a secagem ocorresse unidireccionalmente. A secagem dos provetes resultou na cristalização dos sais retidos na estrutura porosa. Devido ao tempo limitado disponível não foi possível efetuar uma análise detalhada da secagem dos provetes, uma vez que esta exigia meses de acompanhamento. Assim, optou-se apenas por acompanhar visualmente a evolução da cristalização nas primeiras semanas de secagem.

De um modo geral não se registaram diferenças significativas na evolução da cristalização entre os provetes monolíticos e os provetes com interface de contacto perfeito e de contacto hidráulico, para o mesmo tipo de sal. A frente húmida atingiu a superfície superior destes três tipos de provetes e a interface não teve influência na cristalização obtida em cada caso.

As figuras 4.48 e 4.49 ilustram genericamente a evolução da cristalização nos provetes monolíticos imersos em soluções saturadas de sulfato de sódio e cloreto de potássio, respetivamente. Ao comparar as figuras 4.48 e 4.49 é possível verificar que os provetes imersos em sulfato de sódio começaram a cristalizar primeiro e apresentaram maior volume de cristais formados ao fim de cinco semanas. No anexo 3 apresenta-se também a evolução da cristalização em todos os provetes ensaiados com sais. Não foi necessário incluir imagens dos provetes de água, uma vez que nestes não se registou qualquer cristalização ou outro tipo de alteração face ao seu estado original.

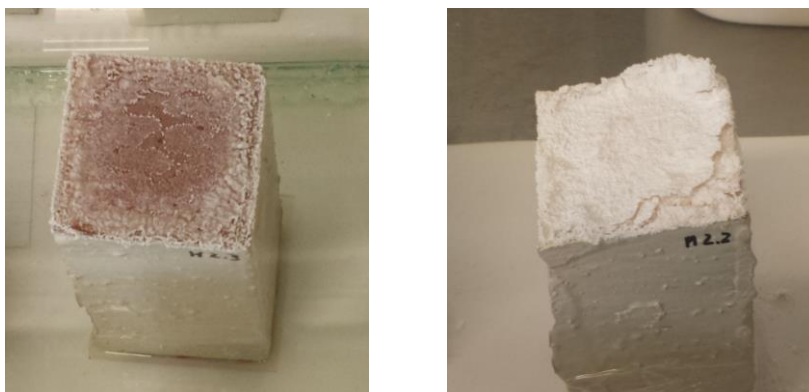


Figura 4.48 – Cristalização no fim do ensaio (esquerda) e após 4 semanas de secagem (direita) de provetes monolíticos imersos em solução saturada de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

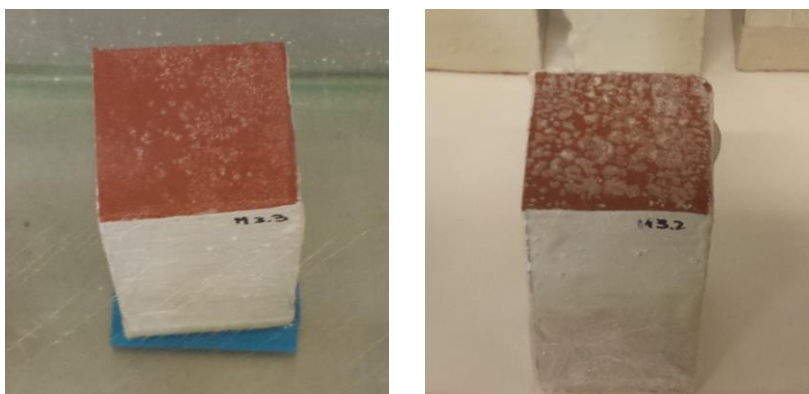


Figura 4.49 – Cristalização no fim do ensaio (esquerda) e após 4 semanas de secagem (direita) de provetes monolíticos imersos em solução saturada de KCl.

Nos provetes com espaço de ar não se observou a formação de cristais na superfície superior dos mesmos. Como referido anteriormente, o fluxo de humidade por capilaridade é interrompido na interface, sendo que, posteriormente, a transferência de humidade ocorre apenas na fase de vapor e em reduzidas quantidades, não se verificando a saturação da camada de tijolo superior, nem a transferência de sais. Assim, foi apenas possível verificar a formação de cristais apenas na superfície superior da camada inferior de tijolo (figuras 4.50 e 4.51). É possível observar ainda que a propagação dos cristais de sulfato de sódio é bastante superior à observada no caso do cloreto de potássio, constatando-se inclusivamente a ascensão dos cristais do primeiro através das ligações metálicas. Nas figuras 4.50 e 4.51 pode-se então observar a cristalização obtida na interface nos ensaios realizados com sulfato de sódio e cloreto de potássio, respetivamente



Figura 4.50 - Cristalização ao fim de 5 semanas em provetes com espaço de ar imersos em solução saturada de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

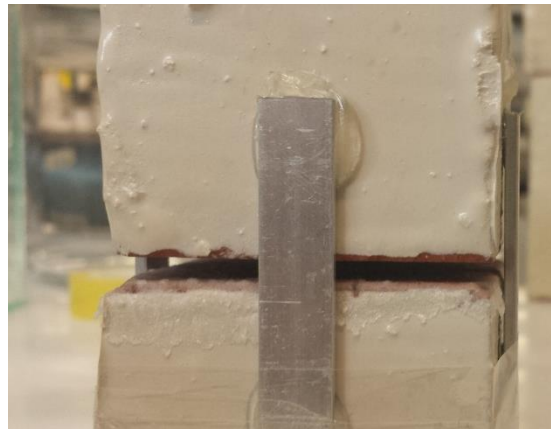


Figura 4.51 - Cristalização ao fim de 5 semanas em provetes com espaço de ar imersos em solução saturada de  $\text{KCl}$ .

O tempo disponível para a secagem dos provetes foi escasso, razão pela qual não foram realizados ensaios para se determinar o índice de secagem, uma vez que estes levariam alguns meses a serem finalizados. No que foi possível observar das primeiras semanas de secagem, constata-se a manifestação de eflorescências nos provetes imersos nos dois tipos de sais em estudo, contudo em nenhum dos casos se verificou a desintegração do tijolo que compõe os provetes. Não se pode, ainda assim, afirmar que esta não irá acontecer, apenas que não é constatada após um curto período de secagem parcial.

#### **4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO**

Neste capítulo de carácter experimental foram calculados os coeficientes de capilaridade dos quatro tipos de provete ensaiados embebidos em água, solução saturada de sulfato de sódio e solução saturada de cloreto de potássio. Foram também calculados os fluxos máximos transmitidos nos provetes com os três tipos de interface estudados para as mesmas soluções. Na tabela 4.18 encontram-se representados os resultados obtidos nos ensaios efetuados.

Tabela 4.18 – Tabela resumo dos resultados obtidos na campanha experimental.

			Solução utilizada					
			Água		Sulfato de sódio		Cloreto de potássio	
			Parâmetro	Valor médio	Coef de variação	Valor médio	Coef de variação	Valor médio
Tipo de provete	Monolítico	A	0,0686	5,00%	0,0538	-	0,0717	6,71%
		FLUMAX	-	-	-	-	-	-
	Contacto perfeito	A	0,0650	4,80%	0,0487	6,65%	0,0705	3,40%
		FLUMAX	48,7×10 <sup>-6</sup>	6,10%	37,4×10 <sup>-6</sup>	21,7%	69,8×10 <sup>-6</sup>	17,68%
	Espaço de ar	A	0,0650	4,80%	0,0487	6,65%	0,0705	3,40%
		FLUMAX	3,88×10 <sup>-6</sup>	3,83%	1,90×10 <sup>-6</sup>	2,23%	2,03×10 <sup>-6</sup>	9,98%
	Pasta de contacto	A	0,0650	4,80%	0,0487	6,65%	0,0705	3,40%
		FLUMAX	68,9×10 <sup>-6</sup>	-	33,2×10 <sup>-6</sup>	9,79%	35,9×10 <sup>-6</sup>	19,7%

# 5

## CONCLUSÃO

### 5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao concluir este trabalho é possível afirmar que os objetivos inicialmente propostos foram atingidos, nomeadamente a avaliação da influência dos dois sais escolhidos e dos três tipos de interface nos processos de embebição dos provetes de tijolo.

Este trabalho revelou-se exigente, não apenas por envolver a pesquisa e estudo exaustivos da bibliografia existente sobre os sais solúveis e o fenómeno da interface, mas também pela componente laboratorial que lhe está associada, que requereu algum cuidado e tempo na sua execução e no tratamento dos dados obtidos.

A partir dos ensaios experimentais realizados foi possível concluir-se que:

- Os dois sais utilizados influenciam de forma distinta o coeficiente de capilaridade. A presença de sulfato de sódio traduz-se numa diminuição deste parâmetro em relação aos ensaios realizados com água, ao passo que com cloreto de potássio se verifica um aumento do coeficiente de capilaridade apesar desta variação ser menos expressiva;
- Não se verifica a influência dos sais no coeficiente de capilaridade dos provetes com interface face aos provetes monolíticos;
- As variações registadas entre os coeficientes de capilaridade dos provetes monolíticos e dos provetes com interface devem-se à espessura da camada, observando-se que este coeficiente cresce com o aumento da espessura da camada;
- Nos três tipos de provetes com interface ensaiados observa-se uma resistência hídrica que perturba o fluxo transmitido na interface;
- A presença de sulfato de sódio nos provetes com interface de contacto perfeito traduz-se num decréscimo do fluxo máximo transmitido face ao valor de referência. Por outro lado observa-se o inverso relação ao cloreto de potássio;
- Ambos os sais estudados provocam a diminuição muito significativa do fluxo máximo transmitido na interface em provetes com espaço de ar face aos ensaios realizados com água. Os fluxos máximos transmitidos calculado para os dois sais encontram-se relativamente próximo entre si;
- Em relação aos provetes com interface de contacto hidráulico existe um decréscimo no fluxo máximo transmitido nos ensaios com ambos os sais face aos ensaios com água. Deve no entanto incluir-se a ressalva de que estes resultados não foram muito conclusivos uma vez que houve uma elevada dispersão dos mesmos;

- O tipo de cristalização obtida na superfície superior dos provetes é semelhante entre os provetes monolíticos, com interface de contacto perfeito e com interface de contacto hidráulico para o mesmo tipo de sal.
- Aparentemente não se verifica o transporte de sais entre as camadas de tijolo nos provetes com espaço de ar uma vez que não é visível a cristalização dos sais nem mesmo na superfície inferior da camada superior de tijolo. No entanto é possível observar cristalização na superfície superior da camada inferior de tijolo semelhante à observada na superfície superior dos restantes provetes para o mesmo tipo de sal.

## **5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Na sequência deste trabalho, surgem outras opções de investigação relacionadas com os temas abordados. Assim, apresentam-se algumas propostas para futuras investigações nesta área:

- Analisar a influência da interface de contacto hidráulico uma vez que os resultados obtidos neste tipo de provetes foram pouco conclusivos. Seria interessante estudar experimentalmente o efeito da variação do rácio água/cimento no fluxo máximo transmitido através da interface tijolo/argamassa, assim como fazer uma análise comparativa desses resultados com valores obtidos em ensaios de provetes com interface de contacto hidráulico próximo do perfeito, conseguida através da execução das juntas com caulim;
- Realizar ensaios semelhantes aos que foram efetuados neste trabalho com outros materiais, como a utilização de materiais pétreos em substituição do tijolo;
- Realizar ciclos de cristalização/dissolução em provetes semelhantes de forma a avaliar a variação do coeficiente de capilaridade e do fluxo máximo transmitido em função destes mesmos ciclos, bem como registar a evolução da degradação dos provetes em função dos ciclos;
- Avaliar a influência da temperatura ambiente no coeficiente de capilaridade de provetes ensaiados com água e com diferentes tipos de sais e no fluxo máximo transmitido na interface.
- Efetuar ensaios de secagem em provetes com interface de contacto perfeito, contacto hidráulico e com espaço de ar imersos em diferentes tipos de soluções aquosas salinas, uma vez que estes não foram possíveis de efetuar no presente trabalho por requerer bastante tempo para a sua execução;

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Brown, T., LeMay, H., Bursten, B. *Chemistry – The Central Science – Seventh Edition*. Prentice Hall, Nova Jersey, 1997.
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Salt\\_\(chemistry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Salt_(chemistry)). 24 de Janeiro de 2014.
- [3] Strege, C. *On (pseudo-) polymorphic phase transformations*. Dissertação de Doutorado, Universidade Martin Luther de Halle-Wittenberg.
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Crystallization>. 3 de Fevereiro de 2014.
- [5] Gonçalves, T. *Salt crystallization in plastered or rendered walls*. Dissertação de Doutorado, Instituto Superior Técnico e Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [6] Rijniers, L. *Salt crystallization in porous materials: an NMR study*. Dissertação de Doutorado, Universidade Tecnológica de Eindhoven.
- [7] Charola, A. *Salts in the deterioration of porous materials*. Journal of the American Institute for Conservation, 2000.
- [8] Freitas, V., Torres, M., Guimarães, A. *Humidade Ascensional*. FEUP edições, Porto, 2008.
- [9] Shaw, H. *Determination of the open and closed porosity in an immobilized pu ceramic wasteform*. Lawrence Livermore National Laboratory, 1998.
- [10] Cardeira, A. *Análise Macroscópica do efeito de dois modificadores de cristalização com baixa toxicidade*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Faculdade Nova de Lisboa.
- [11] <http://en.wikipedia.org/wiki/Constrictivity>. 11 de Fevereiro de 2014.
- [12] <http://en.wikipedia.org/wiki/Tortuosity>. 11 de Fevereiro de 2014.
- [13] Takahashi, H. Seida, Y. Yui, M. *3D X-ray CT and diffusion measurements to assess tortuosity and constrictivity in a sedimentary rock*. Diffusion-fundamentals.org, 2009.
- [14] Gonçalves, T., Rodrigues, J. *Evaluating the salt content of salt-contaminated samples on the basis of their hygroscopic behavior. Part I: Fundamentals, scope and accuracy of the method*. Journal of Cultural Heritage, 2006.
- [15] Gonçalves, T., Rodrigues, J. *Evaluating the salt content of salt-contaminated samples on the basis of their hygroscopic behavior. Part II: Experiments with nine common soluble salts*. Journal of Cultural Heritage, 2006.
- [16] Krus, M. *Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials – Theoretical principles and new test methods*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1996.
- [17] Qiu, X. *Moisture transport across interfaces between building materials*. Dissertação de Doutorado, Universidade Concordia, Montreal, 2003.
- [18] Marten, J., *Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels*. Dissertação de Licenciatura, Instituto de Tecnologia de Lund.
- [19] Janssen, H. *Thermal diffusion of water vapour in porous materials: fact or fiction?*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011.

- [20] <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/Details:WaterVaporDiffusion>. 3 de Março de 2014.
- [21] Azevedo, J. *Absorção por capilaridade de soluções Salinas em materiais porosos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [22] <http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Efflorescence>. 2 de junho de 2014.
- [23] <http://cusjc.ca/wintertimes/?p=670>. 2 de junho de 2014.
- [24] Collepardi, M., Collepardi, S., Troli, R. *Salt weathering of masonry walls the Venice experience*.
- [25] Lopez-Arce, P., Doehne, E., Greenshields, J., Benavente, D., Young, D. *Treatment of rising damp and salt decay: the historic masonry buildings of Adelaide, South Australia*.
- [26] Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E., Sebastian, E. *How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials*. Cement and Concrete Research, 2000.
- [27] Ruiz-Agudo, E., Mees, F., Jacobs, P., Rodriguez-Navarro, C. *The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates*. Environmental Geology, 2006.
- [28] Shahidzadeh, N., Desarnaud, J., Bertrand, F., Chateau, X., Bonn, D. *Damage in porous media due to salt crystallization*.
- [29] Freitas, V. *Transferência de humidade em paredes de edifícios – Análise do fenómeno de interface*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1992.
- [30] Depraetere, W., Carmeliet, J., Hens, H. *Moisture transfer at interfaces of porous materials: measurements and simulations*.
- [31] Derluyn, H., Janssen, H., Carmeliet, J. *Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials*. Construction and Building Materials, 2011.
- [32] Cunha, M. *Influência da interface na cinética de embebição e secagem de paredes com múltiplas camadas*. Dissertação de Mestrados, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [33] [http://en.wikipedia.org/wiki/Raoult%27s\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Raoult%27s_law). 20 de Junho de 2014.
- [34] *Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars*. ASTM C1403-05.
- [35] *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water absorption coefficient by partial immersion*. EN ISO 15148:2002.
- [36] *RILEM TC 25-PEM Recommendend tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods*, Materials and Structures, vol. 13, pp. 204-209, 1980.
- [37] de Vries, D.A., Philip, J.R. *Soil heat flux, thermal conductivity and the null-alignment method*. Soil Science Society of America, 1986.
- [38] Mukhopadhyaya, P., Kumaran, K., Normandin, N., Goudreau, P. Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials. Journal of Thermal Envelope and Building Science, 2002.



## ANEXO 1

Exemplo da folha de cálculo dos valores do ensaio de absorção em provetes com contacto perfeito parcialmente imersos em solução saturada de cloreto de potássio:

t (min)	t (s)	$\sqrt{t}$ (s <sup>0,5</sup> )	M <sub>i</sub> (g)	M <sub>i</sub> -M <sub>0</sub> (g)	M <sub>w,i</sub> (kg/m <sup>2</sup> )
0	0	0,000	581,309	0,000	0,000
1	60	7,746	582,447	1,138	0,428
3	180	13,416	583,129	1,820	0,684
5	300	17,321	583,774	2,465	0,926
10	600	24,495	584,601	3,292	1,237
15	900	30,000	585,413	4,104	1,542
30	1800	42,426	586,872	5,563	2,091
60	3600	60,000	589,182	7,873	2,959
90	5400	73,485	591,113	9,804	3,684
120	7200	84,853	592,838	11,529	4,333
150	9000	94,868	594,294	12,985	4,880
180	10800	103,923	595,718	14,409	5,415
210	12600	112,250	597,098	15,789	5,934
300	18000	134,164	600,428	19,119	7,185
330	19800	140,712	601,376	20,067	7,541
360	21600	146,969	602,165	20,856	7,838
390	23400	152,971	602,801	21,492	8,077
420	25200	158,745	603,175	21,866	8,217
450	27000	164,317	603,520	22,211	8,347
480	28800	169,706	603,770	22,461	8,441
1380	82800	287,750	611,942	30,633	11,512
1500	90000	300,000	613,094	31,785	11,945
1620	97200	311,769	614,201	32,892	12,361
1740	104400	323,110	615,312	34,003	12,779
1860	111600	334,066	616,481	35,172	13,218
2880	172800	415,692	624,915	43,606	16,387
3000	180000	424,264	625,457	44,148	16,591
3180	190800	436,807	626,095	44,786	16,831
3300	198000	444,972	626,321	45,012	16,916
4320	259200	509,117	626,824	45,515	17,105
4500	270000	519,615	626,933	45,624	17,146
4740	284400	533,292	626,954	45,645	17,154
8640	518400	720,000	627,779	46,470	17,464
9060	543600	737,292	627,906	46,597	17,511



## ANEXO 2

Exemplo da folha de cálculo da área real corrigida da base, no caso para provetes ensaiados com água:

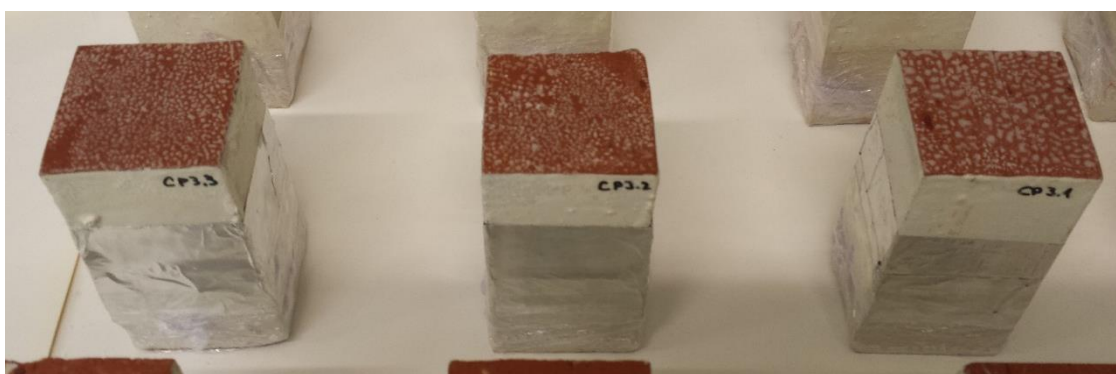
Dimensões da base dos provetes									
Proвете	a (mm)			b (mm)			Área (mm <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Diferença em relação projetado
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 1	Medição 2	Medição 3			
M1.1	53,48	53,28	52,58	51,16	51,24	51,55	2725,60	2,73E-03	9,02%
M1.2	50,76	51,41	51,6	50,95	51,31	51,81	2632,37	2,63E-03	5,29%
M1.3	50,87	51,13	51,7	51,96	51,95	51,78	2658,84	2,66E-03	6,35%
CP1.1	50,16	50,73	50,87	49,81	49,08	48,83	2490,89	2,49E-03	-0,36%
CP1.2	51,39	51,55	51,5	50,88	50,89	50,87	2619,30	2,62E-03	4,77%
CP1.3	50,9	50,87	50,9	52,39	51,61	51,87	2644,07	2,64E-03	5,76%
EA1.1	51,64	51,24	51,1	52,22	51,86	51,47	2661,29	2,66E-03	6,45%
EA1.2	49,63	49,99	50,21	51,03	51,11	51,09	2550,94	2,55E-03	2,04%
EA1.3	50,77	51,43	51,66	52,53	52,08	51,78	2673,57	2,67E-03	6,94%
PC1.1	50,61	50,73	50,71	49,03	49,07	49,1	2486,86	2,49E-03	-0,53%
PC1.2	51,25	51,45	51,01	51,05	50,95	50,78	2609,31	2,61E-03	4,37%
PC1.3	50,99	50,95	50,77	51,73	52,08	52,24	2647,82	2,65E-03	5,91%
PC3.3	51,19	51,2	51,53	51,35	51,13	51,1	2626,56	2,63E-03	5,06%



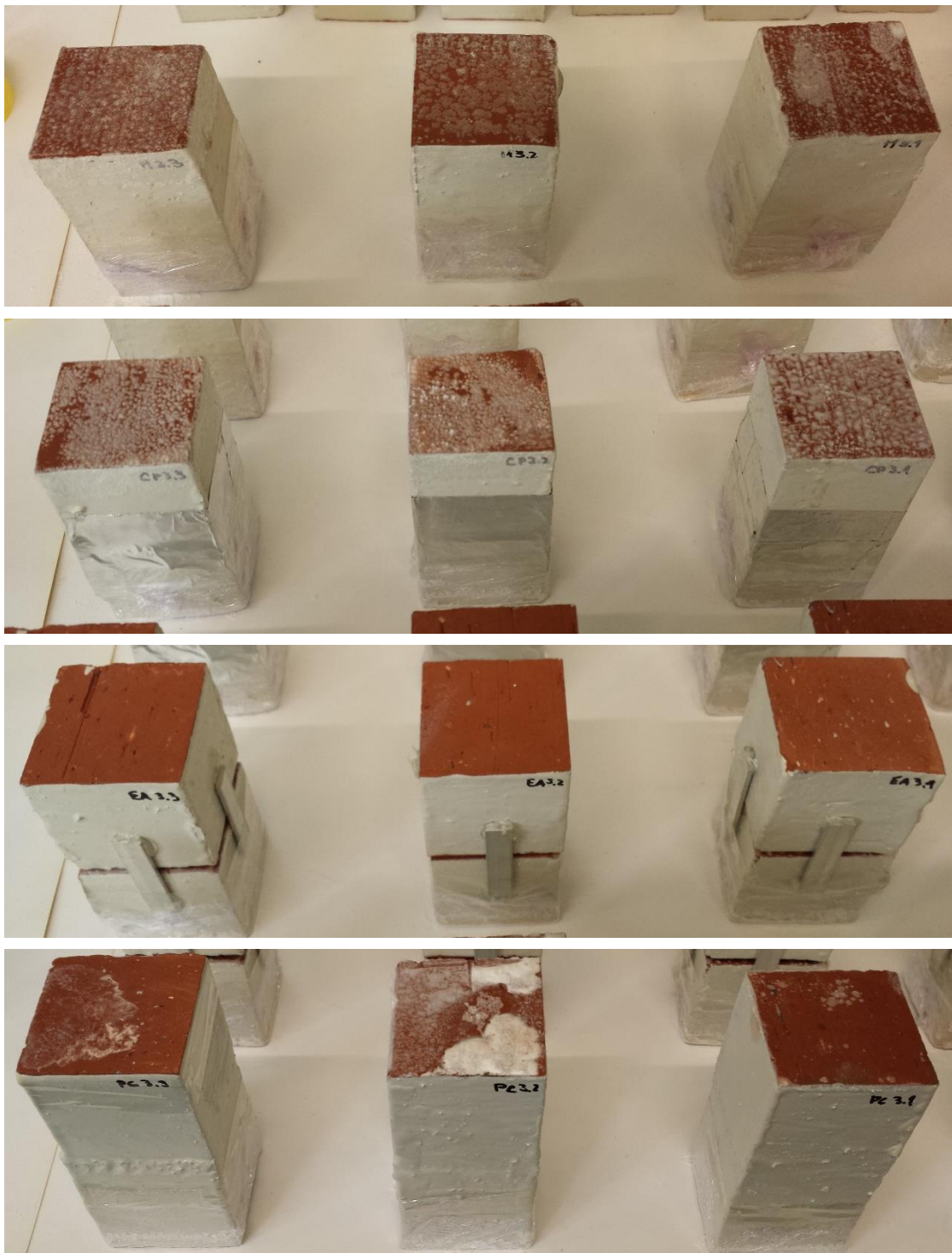
### ANEXO 3

Nesta anexo apresenta-se a evolução da cristalização do provetes a partir do momento em que se inicia a secagem dos mesmos.

- Provetes parcialmente imersos em solução aquosa saturada de cloreto de potássio:
  - Início da secagem:

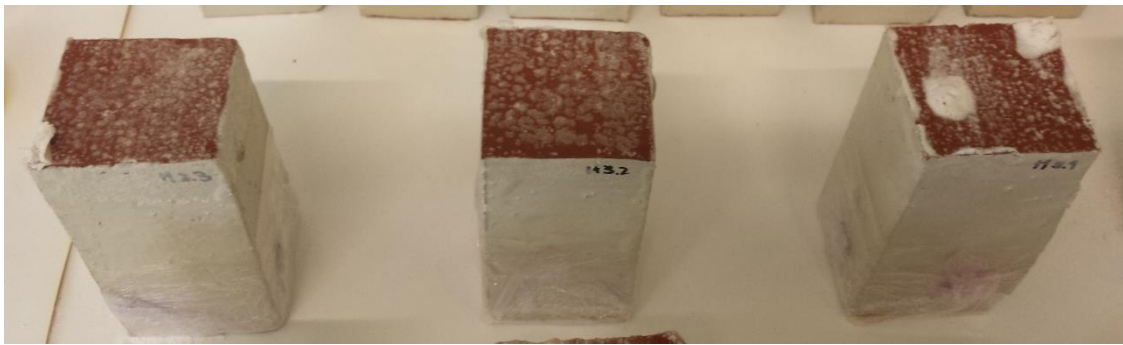


- Ao 7º dia de secagem (os provetes M3.1 e M3.3 estão com posições trocadas em relação à imagem anterior):

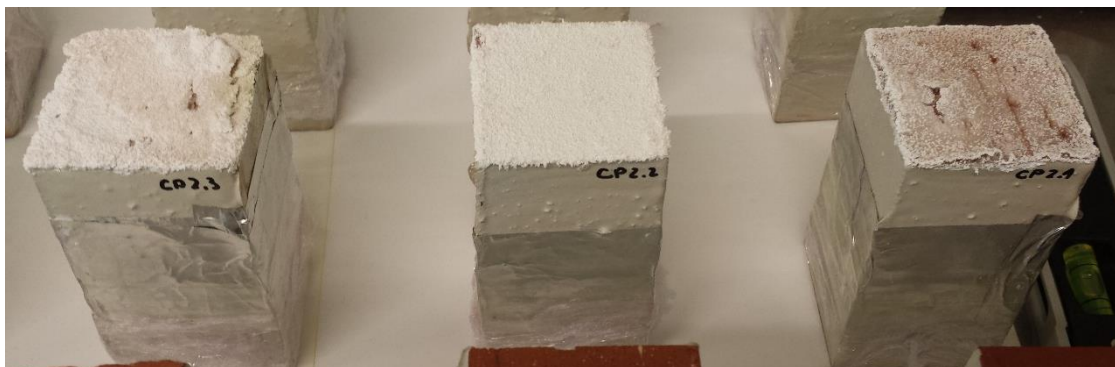
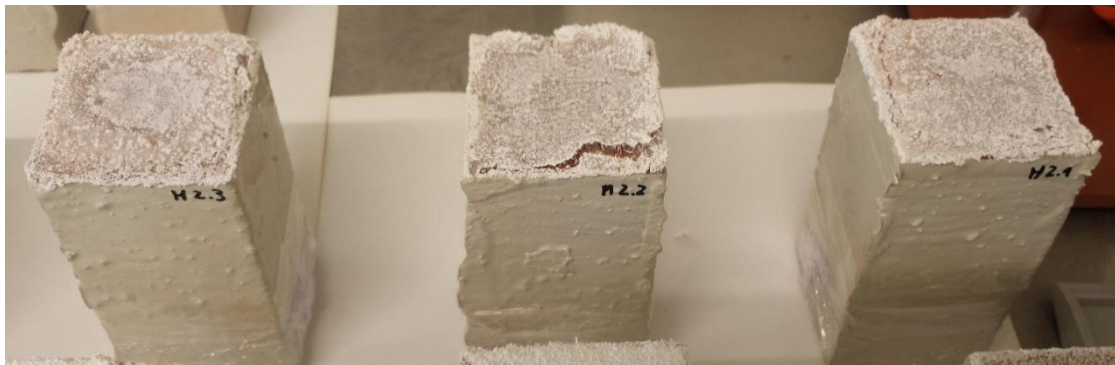




- Na 6ª semana de secagem:

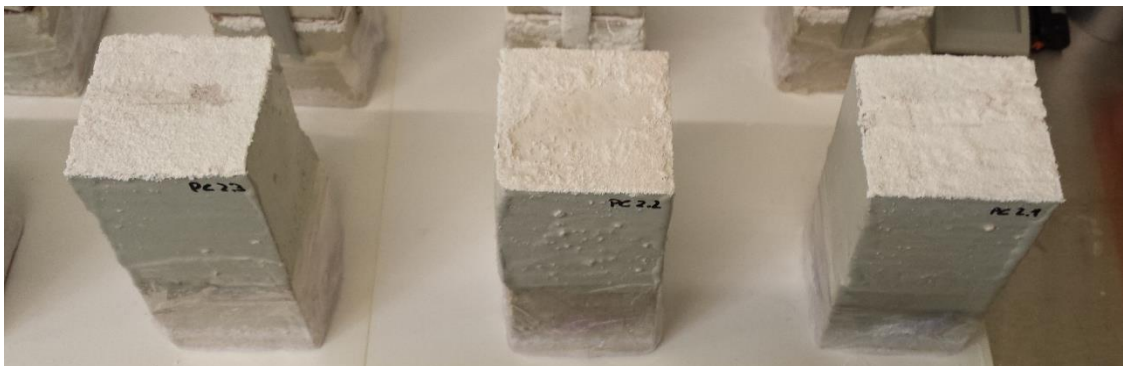
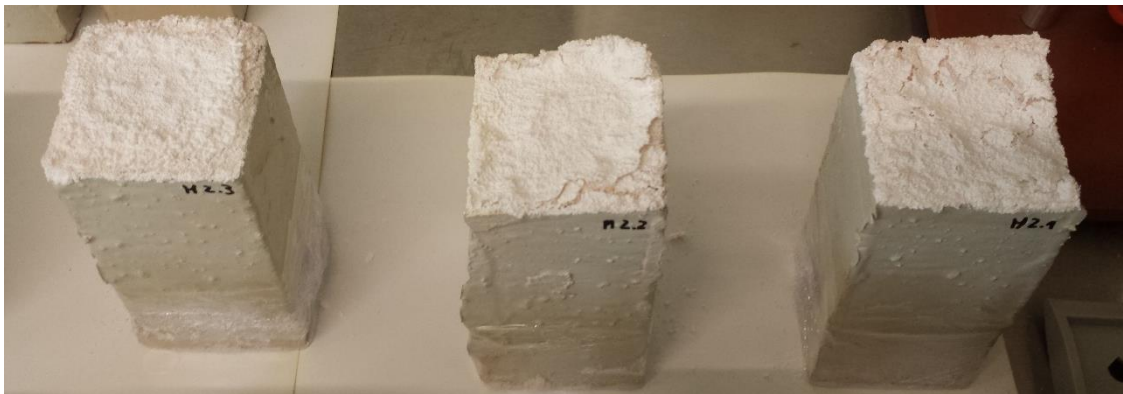


- Provetes parcialmente imersos em solução aquosa saturada de sulfato de sódio
  - Início da secagem (os provetes CP2.2, CP2.3, PC2.2 e PC2.3) têm mais 5 dias de secagem que os restantes:





- Ao 7º dia de secagem:



- Na 6ª semana de secagem:

